

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**CONTRIBUCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN  
EXPERIMENTAL DEL CANAL RADIO  
INTERIOR PARA SISTEMAS 5G**  
(Contribution to the experimental  
characterization of the indoor radio channel  
for 5G systems)

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Daniel García García

Julio - 2019



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por:** Daniel García García

**Director del TFG:** Jesús Ramón Pérez López

**Título:** “Contribución a la caracterización experimental del canal radio interior para sistemas 5G”

**Title:** “Contribution to the experimental characterization of the indoor radio channel for 5G systems”

**Presentado a examen el día:** 26 de Julio de 2019  
para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Torres Jiménez, Rafael Pedro

Secretario (Apellidos, Nombre): Canteli Mañana, Mario

Vocal (Apellidos, Nombre): Pérez López, Jesús Ramón

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº



## **Agradecimientos**

*A Jesús R. Pérez, por lo muchísimo que me ha ayudado.*

*A mis padres, por todo el apoyo que me han dado durante estos años.*

*A mis compañeros de fatiga, que han recorrido este camino conmigo.*

*Muchas gracias a todos.*

<b>Índice</b>	<b>Pág.</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto	1
1.2 Sistemas 5G	3
1.3 Espectro radioeléctrico	4
1.4 Objetivos y estructura del trabajo	5
<b>2 Caracterización del canal en banda ancha</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción	6
2.2 Parámetros	6
2.2.1 Pérdidas de propagación	7
2.2.2 Perfil potencia retardo	8
2.2.3 RMS delay Spread	9
2.2.4 Ancho de banda de coherencia	9
2.3 Sistema de medida	10
2.3.1 Hardware del sistema de medida	11
2.3.2 Software del sistema de medida	14
<b>3 Resultados</b>	<b>18</b>
3.1 Introducción	18
3.2 Escenarios de medida	18
3.2.1 Escenario 1: Sala Multiusos	19
3.2.2 Escenario 2: Laboratorio S220	21
3.3 Configuración de las medidas	25
3.4 Software de postprocesado	26
3.5 Resultados: Escenario 1	27
3.5.1 Path Loss	27

3.5.2	PDP	29
3.5.3	RMS delay spread	31
3.5.4	Ancho de banda de coherencia	32
3.6	Resultados: Escenario 2	33
3.6.1	Path Loss, LOS	33
3.6.2	Path Loss, NLOS	34
3.6.3	PDP, LOS	35
3.6.4	PDP, NLOS	38
3.6.5	RMS delay spread, LOS	38
3.6.6	RMS delay spread, NLOS	40
3.6.7	Ancho de banda de coherencia, LOS	41
3.6.8	Ancho de banda de coherencia, NLOS	42
3.7	Conclusiones	44
<b>4</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>45</b>
4.1	Conclusiones	45
4.2	Líneas futuras	46
<b>5</b>	<b>Referencias</b>	<b>47</b>

# Lista de figuras

Pág.

## Capítulo 1

Figura 1.1 Escenarios de utilización de las IMT.	1
Figura 1.2 Mejora de las capacidades fundamentales de las IMT.	2
Figura 1.3 Fases y plazos previstos para IMT-2020.	2
Figura 1.4 Hoja de Ruta y acciones clave del Plan Nacional 5G.	3
Figura 1.5 Ejes de Plan Nacional 5G.	4
Figura 1.6 Bandas de frecuencias identificadas para 5G en Europa.	5

## Capítulo 2

Figura 2.1 Ejemplo de PDP normalizado al máximo.	8
Figura 2.2 Arquitectura del sistema de medida.	11
Figura 2.3 Unidades lineales, motores y antena.	11
Figura 2.4 Antenas utilizadas.	12
Figura 2.5 Características básicas de las antenas utilizadas.	13
Figura 2.6 Menú principal.	14
Figura 2.7 Interfaz principal que da acceso a la configuración de medida.	15
Figura 2.8 Acceso a la configuración del analizador de redes.	15
Figura 2.9 Acceso a la visualización de resultados.	16
Figura 2.10 Acondicionamiento para compensar las ganancias de las antenas.	16
Figura 2.11 Configuración de puertos.	17

## Capítulo 3

Figura 3.1 Escenarios de medida en el edificio Ingeniería de Telecomunicación José Luis García García.	19
Figura 3.2 Vista en planta de la Sala Multiusos con detalle de los puntos de medida.	19
Figura 3.3 Sala multiusos, vista desde la zona de acceso.	20
Figura 3.4 Sala multiusos, detalle con escáner y antena transmisora al fondo.	20
Figura 3.5 Sala multiusos vista desde un lateral, con sistema de control y medida al fondo.	21
Figura 3.6 Plano del laboratorio S220.	22
Figura 3.7 Laboratorio S220 visto desde la entrada.	23
Figura 3.8 Laboratorio S220 visto desde la esquina frontal derecha.	23
Figura 3.9 Laboratorio S220 visto desde la esquina frontal izquierda.	24
Figura 3.10 Recorrido del barrido.	25
Figura 3.11 Menú principal del software de postprocesado.	26

Figura 3.12 Función PDP y Función Path-Loss.	<b>27</b>
Figura 3.13 Pérdidas de propagación en función de la distancia.	<b>28</b>
Figura 3.14 PDP representativos del escenario 1.	<b>29</b>
Figura 3.15 Trazado de rayos para TX3 en el escenario 1, con rayo directo, 1ª y 2ª reflexión.	<b>30</b>
Figura 3.16 Respuesta al impulso obtenida para TX3 en el escenario 1.	<b>30</b>
Figura 3.17 RMS delay spread y su CDF en el escenario 1.	<b>31</b>
Figura 3.18 Anchos de banda de coherencia y sus CDF en el escenario 1.	<b>32</b>
Figura 3.19 Pérdidas de propagación para transmisores en condiciones LOS.	<b>34</b>
Figura 3.20 Pérdidas de propagación para transmisores en condiciones NLOS.	<b>35</b>
Figura 3.21 PDP en el punto TX3 del laboratorio S220.	<b>36</b>
Figura 3.22 Trazado de rayos para TX3 en el escenario 2, con rayo directo, 1ª y 2ª reflexión.	<b>37</b>
Figura 3.23 Respuesta al impulso obtenida para TX3 en el escenario 2.	<b>37</b>
Figura 3.24 PDP en el punto TX16 del laboratorio S220.	<b>38</b>
Figura 3.25 RMS delay spread y su CDF en el escenario 2, LOS.	<b>39</b>
Figura 3.26 RMS delay spread y su CDF en el escenario 2, NLOS.	<b>40</b>
Figura 3.27 Anchos de banda de coherencia y sus CDF en el escenario 2, LOS.	<b>41</b>
Figura 3.28 Anchos de banda de coherencia y sus CDF en el escenario 2, NLOS.	<b>43</b>



# Lista de tablas

**Pág.**

## Capítulo 3

Tabla 3.1 Distancias de los puntos de transmisión en la Sala Multiusos.	<b>21</b>
Tabla 3.2 Distancias entre transmisor y centro del mallado receptor para cada punto de medida en el Laboratorio S220.	<b>24</b>
Tabla 3.3 Resumen de la configuración de las medidas.	<b>26</b>
Tabla 3.4 Parámetros del ajuste lineal de las pérdidas de propagación en el escenario 1.	<b>28</b>
Tabla 3.5 Parámetros del ajuste lineal de las pérdidas de propagación en el escenario 2, LOS.	<b>34</b>
Tabla 3.6 Parámetros del ajuste lineal de las pérdidas de propagación en el escenario 2, NLOS.	<b>35</b>

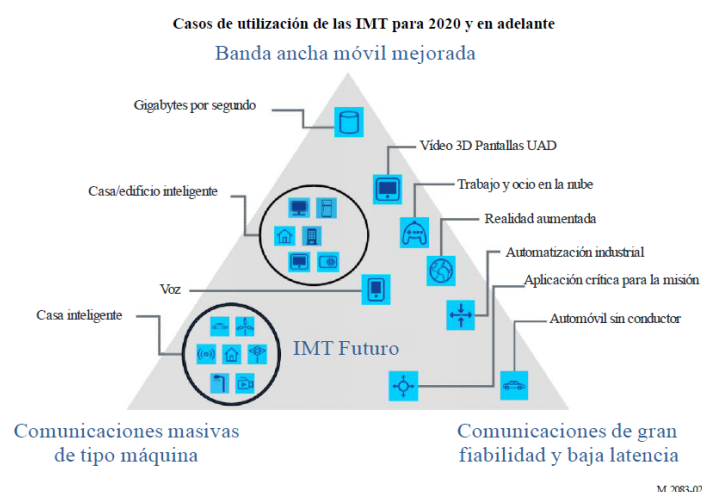


# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Contexto

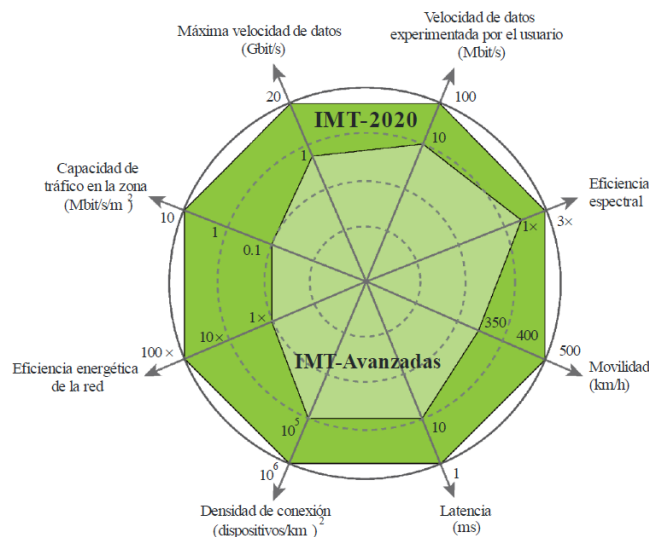
En los últimos años, los sistemas de comunicaciones móviles terrestres e inalámbricas han experimentado un crecimiento en aplicaciones de uso, penetración en la sociedad y tráfico cursado. Tomando como referencia los sistemas de comunicaciones móviles comerciales, la línea temporal que marca la evolución tecnológica de los sistemas se ha ido comprimiendo desde los 15 años para el desarrollo normativo de IMT-2000 (sistemas 3G o de tercera generación) hasta los 9 años de IMT-Advanced (4G) o los no más de 6 años previstos hasta completar las especificaciones y estándares de IMT-2020 (sistemas 5G). Vivimos en una sociedad conectada, con la tecnología totalmente integrada en ella, por lo que cabe esperar que esta tendencia continúe.

Los dispositivos móviles y las tecnologías de comunicaciones cubren una amplia cantidad de usos en el mundo, tanto en la vida cotidiana como en ámbitos más específicos, desde la telefonía móvil, las ciudades inteligentes hasta el IoT (Internet of Things). Los nuevos escenarios de uso de la tecnología llevan aparejado un aumento en la densidad de usuarios o dispositivos conectados. En este sentido, dentro del marco de las IMT (International Mobile Telecommunications), la UIT plantea para la IMT-2020 [1] que define el contexto de los futuros sistemas de quinta generación (5G), los tres escenarios de uso que se muestran en la Figura 1.1: banda ancha móvil mejorada, comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia y comunicaciones masivas de tipo máquina.



**FIGURA 1.1 ESCENARIOS DE UTILIZACIÓN DE LAS IMT**

Para poder cubrir estos escenarios de uso será necesario un aumento de las capacidades de los sistemas IMT. En este sentido, la UIT propone como retos tecnológicos para las nuevas redes los ocho que se resumen en la Figura 1.2 [1] y, entre los que destacan el aumento de velocidad y movilidad de los usuarios, la necesidad de una mayor eficiencia espectral y energética de la red o la reducción de la latencia de red, pensando en este caso en las comunicaciones en tiempo real.

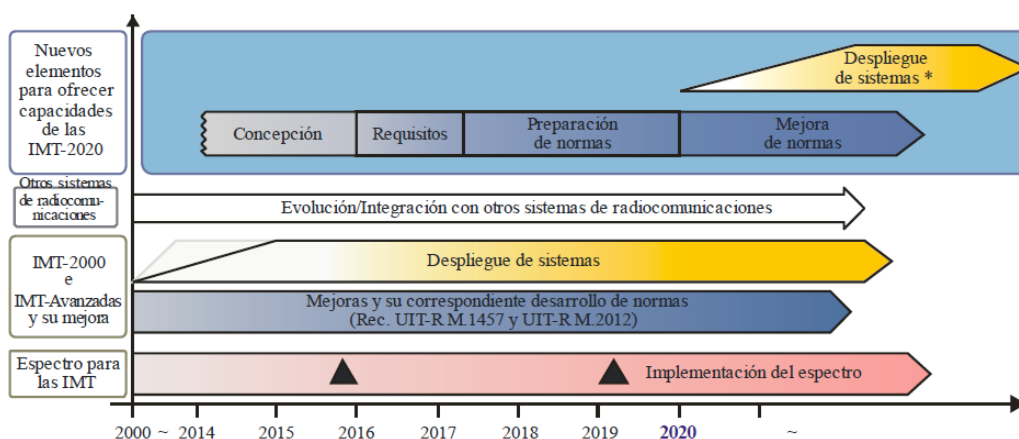


M.2083-03

**FIGURA 1.1 MEJORA DE LAS CAPACIDADES FUNDAMENTALES DE LAS IMT**

Otras capacidades que pueden requerir los sistemas de acuerdo a las especificaciones IMT-2020 [1] incluyen: flexibilidad de espectro y ancho de banda, fiabilidad, resiliencia, seguridad y privacidad de las comunicaciones y una vida útil operativa de la tecnología.

El cronograma y horizonte temporal para dar una respuesta tecnológica a todas las especificaciones y retos de IMT-2020 se detallan en la Figura 1.3.



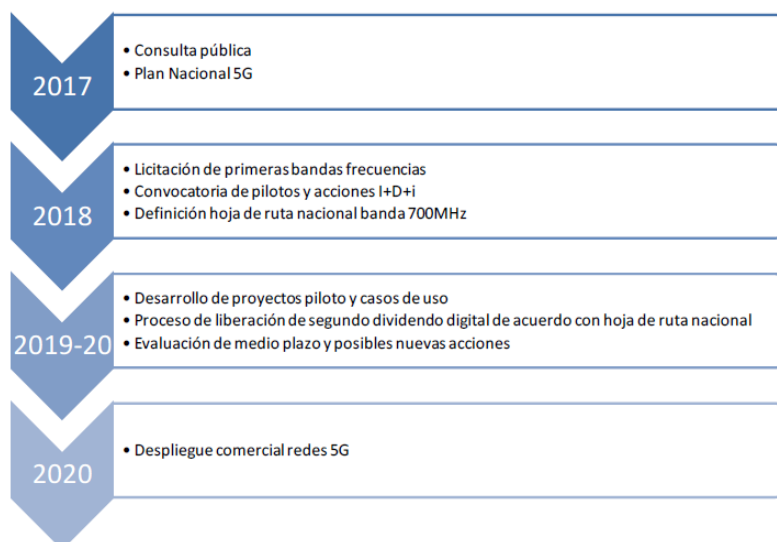
**FIGURA 1.2 FASES Y PLAZOS PREVISTOS PARA LAS IMT-2020**

## 1.2 Sistemas 5G

¿Qué será 5G? Las cuatro generaciones previas de tecnología móvil han sido cada una un cambio de paradigma que ha roto la compatibilidad hacia atrás. Ciertamente, 5G necesitará ser un cambio de paradigma que incluya frecuencias de portadora muy altas con anchos de banda masivos, densidades extremas de estación base y dispositivos y números de antenas sin precedentes. Sin embargo, al contrario que las cuatro generaciones previas, será también altamente integradora: uniendo cualquier nueva interfaz y espectro 5G con LTE y WiFi para ofrecer una elevada tasa de cobertura y una experiencia de usuario nueva [2].

La tecnología 5G no solo constituye el nuevo paradigma de las comunicaciones inalámbricas, sino que será el componente tecnológico esencial en la transformación digital de la sociedad y de la economía en los países más avanzados durante la próxima década. Las principales soluciones habilitadoras para dicha transformación digital, el Internet de las cosas y el big data, la robótica, la realidad virtual o la ultra alta definición, se soportarán sobre la 5G [3].

El despliegue de las primeras redes 5G ya está previsto para 2019 en algunos países del mundo, pero se prevén despliegues más amplios desde 2020 en adelante. En España, el Plan Nacional 5G marca la hoja de ruta para lograr situarnos entre los países a la cabeza del desarrollo de la 5G, con las acciones y el horizonte temporal que se muestra en la Figura 1.4 [3]:



**FIGURA 1.4 HOJA DE RUTA Y ACCIONES CLAVE DEL PLAN NACIONAL 5G**

Tomando como punto de partida los objetivos del Plan Nacional, las medidas a desarrollar se articulan en torno a los tres ejes que se muestran en la Figura 1.5 [3], donde

uno de los más representativos tiene que ver con la gestión y planificación del espectro, pensando en armonizar el espectro y dedicar nuevas bandas a la tecnología 5G.



FIGURA 1.5 EJES DE PLAN NACIONAL 5G

### 1.3 Planificación del espectro radioeléctrico

El Grupo De Política Del Espectro Radioeléctrico (RSPG) de la Unión Europea en su informe de 2016, RSPG16-032 [4] propone a la banda de 3,4-3,8 GHz como la banda de frecuencias principal y prioritaria para la introducción y el desarrollo de la 5G en Europa. No obstante, se necesitará desplegar también en bandas ya armonizadas por debajo de 1 GHz y, concretamente, la banda de 700 MHz es la destinada a tales efectos.

En el futuro se espera subir en frecuencia a bandas más altas. Por ahora la industria móvil apoya la banda de 26 GHz, que es donde más espectro disponible existe, pero más adelante se está estudiando subir aún más, a bandas desde 30 GHz hasta 86 GHz.

Actualmente y atendiendo al Plan Nacional [3], la banda 3,4-3,6 GHz ya ha sido adjudicada para los servicios 5G. En concreto, cuatro licenciatarios disponen de 2x20 MHz, con utilización de los restantes 2x20MHz para servicios de radiolocalización y bandas de guarda. En lo que respecta a la banda 3,6-3,8 GHz, se está completando su proceso de liberación, así que será utilizable en un futuro inmediato.

Por otra parte, la banda de 700 MHz es utilizada actualmente para la difusión de la Televisión Digital Terrestre (TDT) y su disponibilidad para servicios 5G está pendiente de que se complete el segundo dividendo digital.

En la Figura 1.6 se muestran las principales bandas identificadas en Europa para los servicios 5G y los posibles casos de uso en cada una de ellas [3].



FIGURA 1.6 BANDAS DE FRECUENCIAS IDENTIFICADAS PARA 5G EN EUROPA

## 1.4 Objetivos y estructura del trabajo

De acuerdo con la revisión del estado del arte realizado, este trabajo se centra en la caracterización experimental del canal radioeléctrico de entorno interiores, en un intento por contribuir al conocimiento del canal para el despliegue futuro de los sistemas de comunicaciones móviles de quinta generación. Dado el incipiente interés en la banda de 3,4-3,8 GHz, este Trabajo Fin de Grado (TFG) centra sus líneas de actuación en la caracterización en banda ancha del canal radio entre 3 y 4 GHz, obteniendo la estadística de parámetros como la dispersión del retardo, el ancho de banda de coherencia o las pérdidas de propagación para poder extraer conclusiones sobre la influencia del entorno en los sistemas de comunicaciones.

Utilizando un sistema automatizado de medida del canal radio, se realizarán diversas campañas de medida en 2 entornos muy diferentes del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García, considerando situaciones de línea de visión directa entre antenas (LOS – Line Of Sight) y situaciones con ausencia de visión directa entre antenas (NLOS – Non LOS). Del procesado y análisis posterior de las medidas se extraerán conclusiones que permitan identificar situaciones concretas y determinar la influencia del entorno de medida en los resultados.

En lo que respecta a la organización del documento, éste consta de cuatro capítulos. A este primer capítulo de introducción le sigue un segundo capítulo dedicado a presentar los aspectos teóricos y prácticos relacionados con la caracterización del canal radio. Por un lado, se detallan las expresiones de cálculo de los principales parámetros utilizados en este TFG para analizar el canal y, por otro, se detalla el sistema de medida utilizado para realizar las medidas de canal. En el tercer capítulo se incluyen los resultados y su análisis correspondiente, y se incluye un último capítulo con las principales conclusiones y líneas futuras del trabajo.

## ***Capítulo 2. Caracterización del canal en banda ancha***

### **2.1 Introducción**

Como en cualquier sistema de radiocomunicación zonal, en los sistemas de comunicaciones móviles terrestres se utilizan ondas radioeléctricas como soporte para transmitir la información entre extremos sobre el canal radio. A diferencia de medios guiados, el canal radio es hostil, cambia con el tiempo e introduce una serie de perturbaciones que afectan a la señal, entre los que destacan la dispersión temporal y en frecuencia. Además, en entornos de exteriores la presencia de todo tipo de obstáculos como pueden ser los edificios, la vegetación, vehículos o los propios peatones; y en interiores otro tipo de obstáculos como pueden ser las paredes, suelos y techos o el propio mobiliario, da lugar al efecto del multicamino, por el cual llegan al receptor múltiples réplicas de la señal transmitida, cada una de ellas con una atenuación y retardo asociados con la interacción con el medio.

A la vista de los factores comentados, es muy importante realizar una correcta caracterización del canal para el posterior desarrollo y despliegue de los sistemas de comunicaciones. Mediante la caracterización del canal se puede, por ejemplo, conocer las limitaciones que éste impone en términos de anchos de banda máximos sin distorsión, velocidades máximas sin interferencia intersimbólica (ISI) o tasa de error binaria (BER) irreducible.

### **2.2 Parámetros**

En este TFG, para caracterizar el canal radio se han utilizado como referencia una serie de parámetros que nos pueden dar bastante información sobre el comportamiento del canal. Estos parámetros son las pérdidas de propagación del canal, intentando buscar una ley potencial que permita establecer un modelo para los escenarios investigados, el perfil potencia retardo (PDP o power delay profile por sus siglas en inglés) del cual se extrae como parámetro de referencia la dispersión del retardo (RMS o root mean square delay spread) o ya, en el dominio transformado, la función de correlación con la frecuencia, de la cual se extrae como parámetro fundamental el ancho de banda de coherencia, como métrica de la separación entre componentes frecuenciales para las cuales el canal puede considerarse plano, sin introducir distorsión.



### 2.2.1 Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación son la atenuación sufrida por una onda electromagnética en el trayecto entre transmisor y receptor [5]. Estas pérdidas dependen de varios factores como la distancia, la frecuencia, las condiciones del entorno y la altura de las antenas sobre el terreno.

Las pérdidas básicas de propagación son las pérdidas en el espacio libre, si bien el espacio libre sería el vacío, la propagación por la atmósfera terrestre suele considerarse como propagación en el vacío. A la hora de calcular las pérdidas en el espacio libre es preferible considerar antenas isotrópicas como vemos en la ecuación (2.1) [6].

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

Donde  $L_{bf}$  es la pérdida básica de transmisión en el espacio libre,  $d$  es la distancia o separación entre antenas y  $\lambda$  la longitud de onda a la frecuencia de trabajo.

En [7] se presenta una generalización de la fórmula de Friis para el caso de banda ancha, siendo  $h[n]$  la respuesta al impulso medida en el receptor con  $N$  muestras, y la así denominada ganancia de propagación es:

$$PG = \frac{P_r}{P_t} = \sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H[k]|^2. \quad (2.2)$$

En (2.2)  $H[k]$  es la función de transferencia del receptor. Según el procedimiento de calibración y medidas que hemos usado, se verifica que:

$$H[k] = S_{21}[k]. \quad (2.3)$$

Para calcular las pérdidas de propagación generalmente se corrige  $H$  con las ganancias máximas de las antenas, de la siguiente manera:

$$H'[k] = \frac{H[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} = \frac{S_{21}[k]}{\sqrt{g_t[k]g_r[k]}} \quad (2.4)$$

Con lo que las pérdidas de propagación en unidades prácticas se pueden calcular como:

$$PL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{PG} \right) = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{|S_{21}[k]|^2}{g_t[k]g_r[k]} \right) \quad (2.5)$$

Un modelo comúnmente aceptado, según el cual las pérdidas de propagación medias siguen una ley potencial, es:

$$PL_0(d) = PL_0 + 10n' \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \aleph_{dB} \quad (2.6)$$

Donde  $PL_0$  son las pérdidas de propagación a una distancia de referencia,  $d_0$ , considerada 1 m,  $n'$  es el exponente de pérdidas y  $\aleph_{dB}$  es una variable aleatoria relacionada con el desvanecimiento.

### 2.2.2 Perfil Potencia Retardo

La dispersión temporal producida por el canal influye en el rendimiento de un sistema de comunicaciones de banda ancha. El PDP nos da la distribución de la potencia recibida en un canal multicamino en función de los retardos de propagación. El retardo de propagación es la diferencia temporal de llegada de las distintas contribuciones del multicamino. Además, si se conocen los tiempos de llegada de los diferentes mecanismos de acoplo entre antenas, identificando el instante de llegada del rayo directo se puede estimar con cierta precisión la distancia entre antenas.

En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo representativo de PDP. En el eje de abscisas tenemos el tiempo y en el de ordenadas la potencia recibida, normalizada en dB respecto al valor máximo.

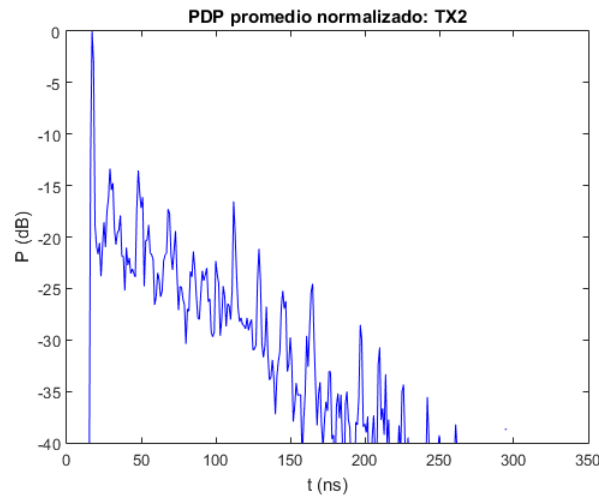


FIGURA 2.3 EJEMPLO DE PDP NORMALIZADO AL MÁXIMO

El PDP nos da información sobre las aportaciones más importantes, que podemos ver como los picos de potencia y así saber la distancia que han recorrido en base al retardo de dichos picos. El rayo directo suele ser el primer pico, que será el más elevado como vemos en el ejemplo de la Figura 2.1, pero no siempre es así, podría recibir más potencia de una reflexión u otra componente del multicamino, cuando por una fuerte obstrucción la componente directa puede verse fuertemente afectada.

El PDP es la función fundamental de la cual se pueden extraer otros parámetros como el retardo medio y la dispersión del retardo (RMS delay spread).

### 2.2.3 RMS delay spread

El RMS delay spread, o dispersión del retardo, es el parámetro estadístico que mejor describe la dispersión temporal del canal. Se puede interpretar como el valor cuadrático medio de la diferencia de tiempo entre la recepción de la primera contribución y la última componente significativa.

El RMS delay spread nos sirve para cuantificar la fuerza de la interferencia entre símbolos (ISI). Si el tiempo de símbolo es lo suficientemente mayor que la dispersión temporal se puede llegar a evitar la ISI, y tiene que ser aproximadamente unas diez veces mayor.

Para calcular el RMS delay spread consideramos el PDP como una distribución estadística de la potencia asociada con cada retardo y se calcula la raíz cuadrada del segundo momento central [8]:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \quad (2.6)$$

Siendo  $\overline{\tau}$  el retardo medio, calculado como:

$$\overline{\tau} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.7)$$

Y  $\overline{\tau^2}$ :

$$\overline{\tau^2} = \frac{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tau^2 P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.8)$$

### 2.2.4 Ancho de banda de coherencia

La dispersión temporal del canal produce selectividad en frecuencia. Una forma de evaluar la selectividad en frecuencia del canal es comparando el ancho de banda del canal con el ancho de banda de coherencia ( $B_c$ ). El ancho de banda de coherencia es la medida estadística del rango de frecuencias sobre las cuales el canal afecta por igual a todas las componentes espectrales [8].

La función de correlación para la frecuencia en canales dispersivos incorrelados estacionarios en sentido amplio (WSSUS) se puede calcular como la transformada de Fourier del PDP:

$$R_{HH} = \sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2 \exp(-j \frac{2\pi}{N} nq) \quad (2.9)$$

Podemos relacionar el ancho de banda de coherencia con el RMS delay spread, considerando valores de correlación típicos de 0.5, 0.7 y 0.9, mediante las aproximaciones que se muestran en (2.10)-(2.12).

$$Bc_{50\%} = \frac{1}{2\pi\tau_{rms}} \quad (2.10)$$

$$Bc_{70\%} = \frac{1}{4.49\tau_{rms}} \quad (2.11)$$

$$Bc_{90\%} = \frac{1}{50\tau_{rms}} \quad (2.12)$$

## 2.3 Sistema de medida

El sistema de medida utilizado consta de dos partes claramente diferenciadas, el hardware de medida y el software de control. A nivel hardware, consta de un posicionador con dos controladores que mueven, a partir de un motor y un reductor, dos ejes (vertical y horizontal) de sendas unidades lineales. La antena receptora irá montada sobre la unidad lineal vertical y, por otra parte, el sistema está conectado a un analizador y a un ordenador desde el que se controlará el sistema. La arquitectura del sistema se detalla en la Figura 2.2. En la Figura 2.3 se muestra una fotografía del escáner plano con detalle de las unidades lineales, motores y la antena. La aplicación de control que regula el movimiento del sistema y procesa las medidas es un programa escrito en Matlab y que ha sido modificado con el tiempo, incluyendo en este TFG algunas modificaciones para mejorar sus prestaciones.

Originalmente, este sistema de medidas se utilizaba para realizar medidas de campo lejano y cercano en una cámara anecoica, pero se ha reacondicionado para realizar medidas del canal radio.

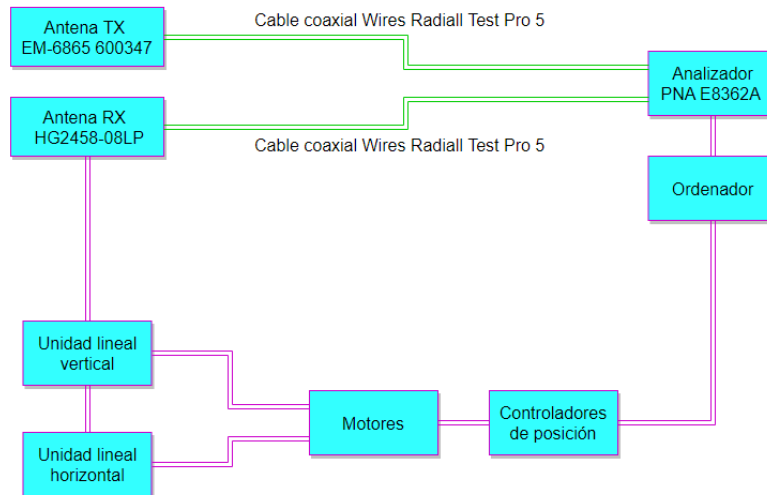


FIGURA 2.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MEDIDA



FIGURA 2.3 UNIDADES LINEALES, MOTORES Y ANTENA

## 2.3.1 Hardware del sistema de medida

### Controladores de posición

Los controladores de posición son los encargados de controlar el movimiento de las unidades lineales. Están conectados al ordenador mediante un puerto serie RS232 y su puesta en marcha se controla mediante dos interruptores magnetotérmicos.

### Unidades lineales

Las dos unidades lineales, dispuestas una en vertical y la otra en horizontal, van montadas una sobre la otra, como puede observarse en la Figura 2.3, permitiendo el

movimiento de la antena sobre un plano vertical. En horizontal tenemos una longitud útil de 138 cm y en vertical unos 80 cm. Como medida de seguridad, al final de las unidades lineales hay unos interruptores de fin de carrera, de forma que, si alcanzamos el final de la unidad, se activa el interruptor y se detiene el movimiento.

## Motores

Para poder mover las unidades lineales cada una tiene un motor acoplado, y cada motor es controlado por el controlador de posición correspondiente. Además, para activarlos se cuenta con los interruptores “enable” y “run” que liberan los ejes y que han de ser previamente activados a la ejecución de una medida.

## Antenas

En las campañas de medida realizadas en este TFG se han utilizado como antena receptora dos tipos de antena bien distintos, una antena omnidireccional bicónica de banda ancha, modelo EM-6865 de Electrometrics, y una antena directiva log periódica de banda ancha, modelo HG2458-08LP de L-Com. En ambos casos, y como antena transmisora, se ha utilizado también una antena EM-6865 de Electrometrics. En la Figura 2.4 se muestra una foto de ambas antenas HG2458-08LP y EM-6865.



(A)

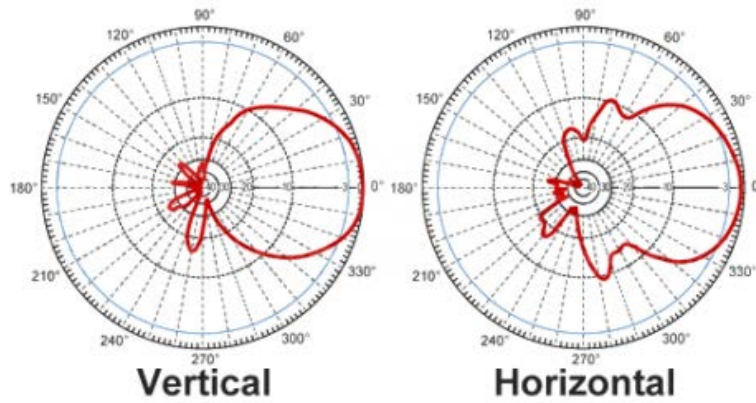


(B)

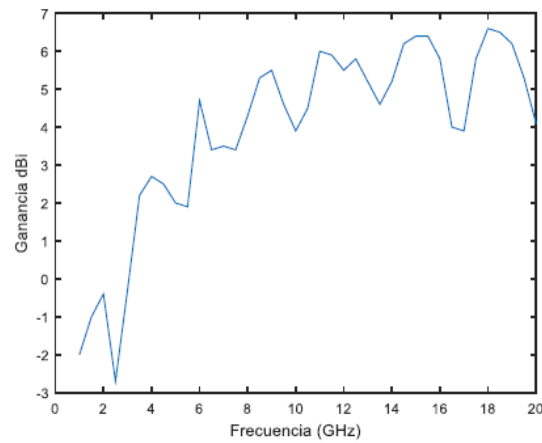
**FIGURA 2.4 ANTENAS UTILIZADAS. (A) ANTENA DIRECTIVA HG2458-08LP. (B) ANTENA OMNIDIRECCIONAL EM-6865 600347**

Según los datos del fabricante, la antena directiva HG2458-08LP tiene una ganancia de 8 dBi. En la Figura 2.5 se incluyen el diagrama de radiación de la antena HG2458-08LP y las curvas de ganancia de las antenas omnidireccionales EM-6865

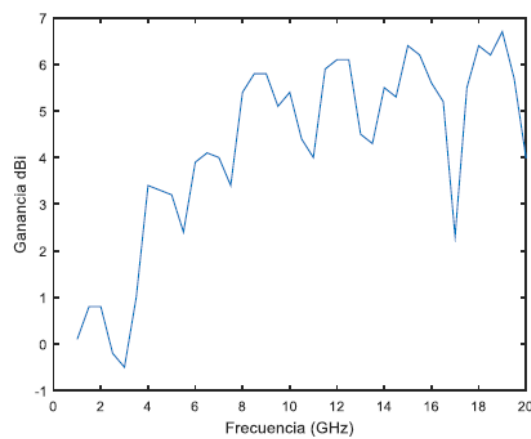
(Modelos 600347 y 600400), utilizadas estas dos últimas como antenas transmisora y receptora, respectivamente.



(A)



(B)



(c)

**FIGURA 2.5 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS ANTENAS UTILIZADAS. (A) DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA DIRECTIVA HG2458-08LP. (B) CURVA DE GANANCIA DE LA ANTENA EM-6865 600347. (c) CURVA DE GANANCIA DE LA ANTENA EM-6865 600400.**

## Analizador de redes

El analizador de redes utilizado en las campañas de medida es el modelo PNA E8362A de Agilent Technologies, conectado a las antenas mediante cables coaxiales y controlado desde el ordenador mediante el bus GPIB.

## Cables coaxiales

La conexión de las antenas al analizador se ha realizado mediante cables coaxiales “Wires Radiall Test Pro 5”. La antena receptora se ha conectado con un cable coaxial de 10 metros de largo y la transmisora utilizando un cable de 15 metros.

### 2.3.2 Software del sistema de medida

El software utilizado para controlar el sistema de medida y procesar las medidas, es el software SIMBA, que fue desarrollado para otro TFG en 2005 [9] y durante los años ha ido sufriendo diversas modificaciones, hasta convertirlo en la herramienta actual. Es un software escrito en MATLAB, aprovechando su entorno gráfico (GUIDE) para desarrollar una aplicación robusta pero, a su vez, intuitiva y fácilmente manejable por el usuario. En la Figura 2.6 se muestra la pantalla principal que da acceso a las facilidades de medida y configuración de puertos de comunicación.

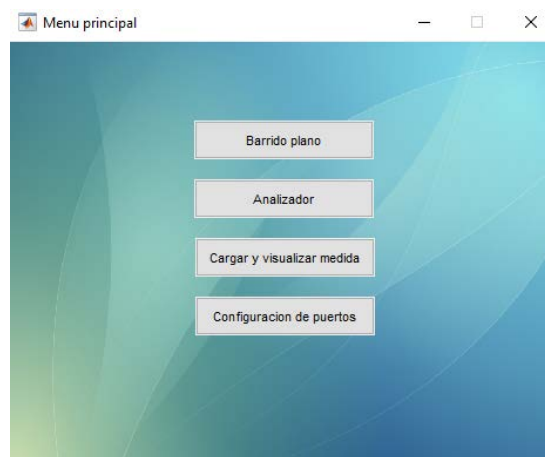


FIGURA 2.6 MENÚ PRINCIPAL

Desde la función “Barrido Plano” se accede a la configuración del analizador y de los parámetros del barrido. Se puede fijar la posición inicial del movimiento, mover la antena a un punto deseado y calibrar su posición sobre el plano en la parte de “Posicionamiento absoluto”. En la sección de “Barrido” podemos establecer la configuración deseada para dicho barrido, elegir el tipo de barrido, en X constante o en Y constante, los puntos inicial y final y el número de puntos del barrido. Se presenta también en tiempo real la posición de la antena sobre el plano de medida. En la Figura 2.7 se presentan todas las funciones descritas con una captura de pantalla.



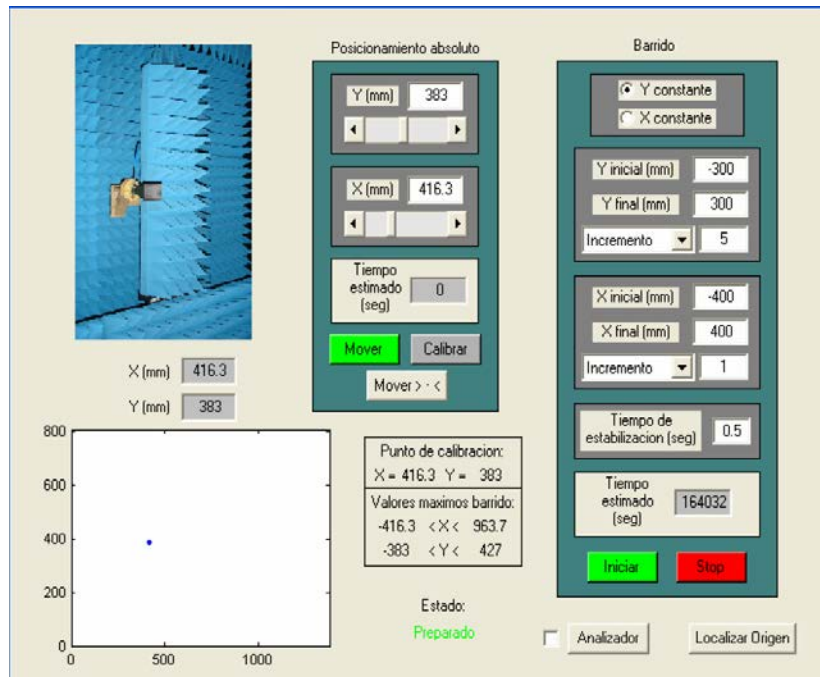


FIGURA 2.7 INTERFAZ PRINCIPAL QUE DA ACCESO A LA CONFIGURACIÓN DE MEDIDA

En la Figura 2.7, desde el botón “Analizador” se accede a la configuración del equipo de medida, seleccionando el calset con datos de la calibración y el parámetro que se desea medir (S11, S12, S21, o S22), de acuerdo con la interfaz que se muestra en la Figura 2.8.

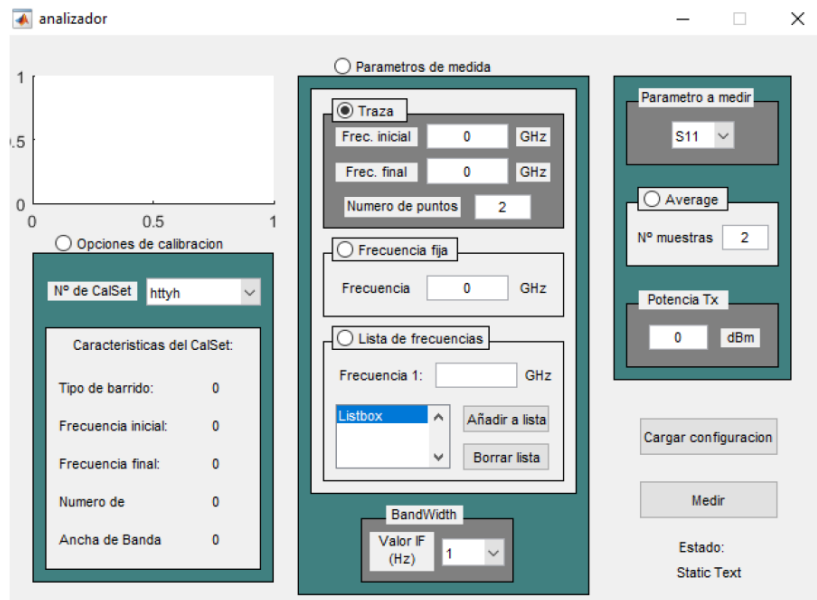


FIGURA 2.8 ACCESO A LA CONFIGURACIÓN DEL ANALIZADOR DE REDES

En el menú principal, Figura 2.6, la función “Cargar y visualizar medida” permite visualizar las medidas realizadas, acondicionarlas y salvarlas como una matriz para facilitar el post-procesado desde Matlab. El acondicionamiento permite compensar las ganancias de las antenas y guardar así la matriz con dichas ganancias ya compensadas. En la Figura 2.9 tenemos la interfaz de “Cargar y visualizar medida” y en la Figura 2.10 se muestra la ventana que permite realizar el “Acondicionamiento” de las medidas.

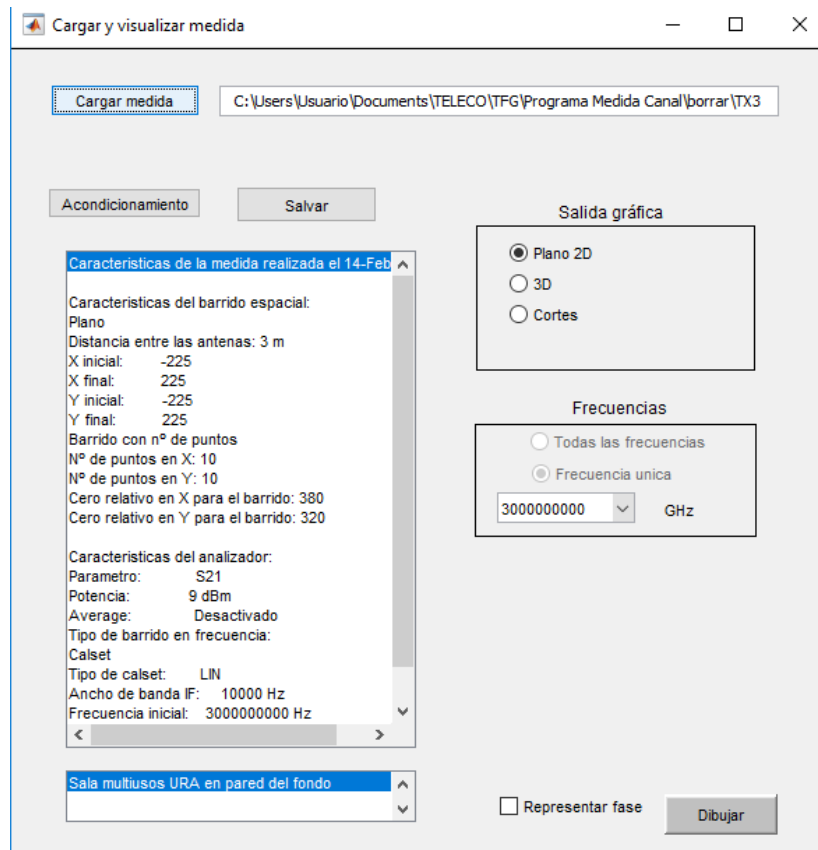


FIGURA 2.9 ACCESO A LA VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

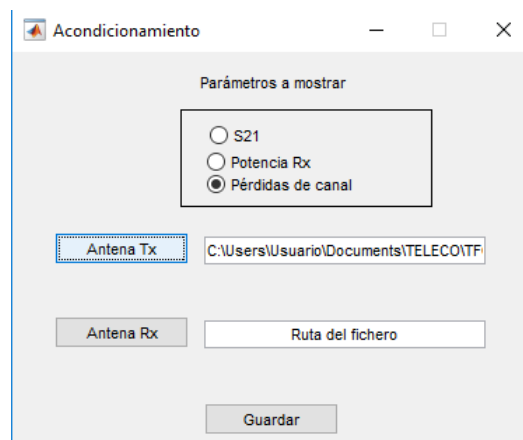
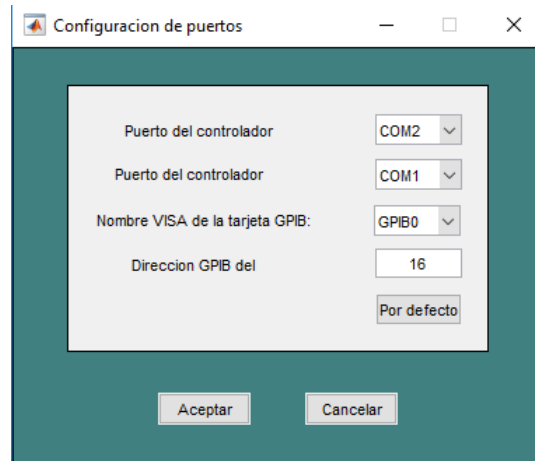


FIGURA 2.10 ACONDICIONAMIENTO PARA COMPENSAR LAS GANANCIAS DE LAS ANTENAS

Por último, la última función a la que se puede acceder desde el menú principal de la Figura 2.6, “Configuración de puertos”, permite al usuario configurar todas las interfaces del sistema de medida, de acuerdo con la pantalla de configuración que se muestra en la Figura 2.11.



**FIGURA 2.11 CONFIGURACIÓN DE PUERTOS**

En este TFG se hicieron algunas modificaciones al software para mejorarlo. Se arregló un problema existente que hacía que, tras acondicionar una medida, las siguientes medidas cargadas las considerase erróneamente como acondicionadas. También se eliminó otro fallo que hacía que las matrices guardadas no tuviesen el mismo nombre que el archivo en el que se almacenaban, dando lugar a errores en la lectura de los resultados al tratar de procesarlos.

## ***Capítulo 3. Resultados***

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en las campañas de medida llevadas a cabo en este TFG. Se detallará los escenarios de medidas en los que han sido realizadas, asociados con diferentes espacios de interior del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García García de la Universidad de Cantabria, así como la configuración con la que se han realizado dichas medidas.

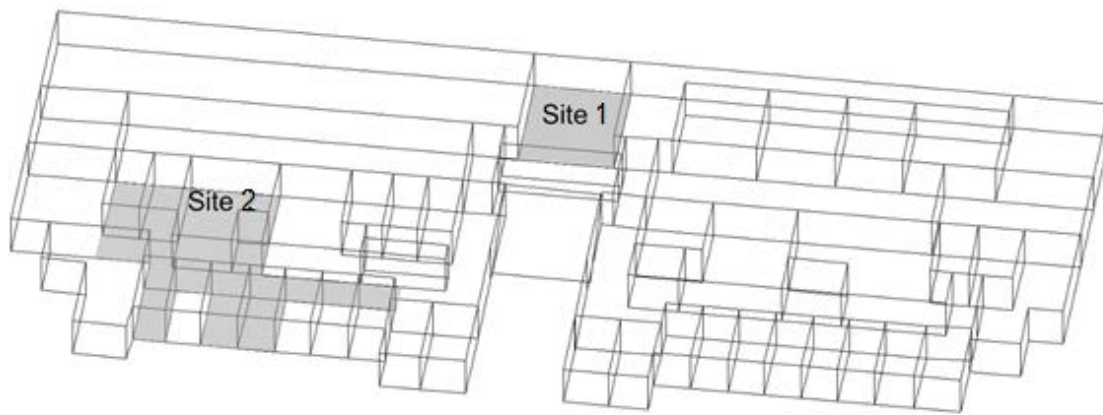
Con el analizador de redes previamente calibrado se ha medido el parámetro S21, parámetro representativo de la función de transferencia del canal, y se ha utilizado éste para extraer los parámetros de banda ancha del canal radio, centrando el análisis en el PDP, el RMS delay spread o el ancho de banda de coherencia, parámetros ya introducidos al lector en el capítulo previo. En base a estos resultados, se sacará la información y las conclusiones necesarias para caracterizar el canal en el rango de frecuencias de 3 a 4 GHz, con la idea de contribuir al estado del arte y conocimiento de cara al despliegue de los sistemas móviles de quinta generación.

### **3.2 Escenarios de medida**

Las campañas de medida se han llevado a cabo en el interior del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García García de la Universidad de Cantabria. En concreto, los dos escenarios considerados se ubican en la planta -2 del edificio y tienen unas características, tanto arquitectónicas como de uso, muy diferentes. El escenario 1 es la así denominada Sala Multiusos y el escenario 2 es el Laboratorio de simulación S220. En la Figura 3.1 se puede observar un plano 3D de la segunda planta del edificio, sobre el cual se resaltan los dos espacios en los que se han realizado las medidas.

En las siguientes subsecciones se incluye una descripción de ambos escenarios de medida, incluyendo en detalle los puntos de medida considerados. Cabe resaltar que, en cada escenario de medida, el escáner plano (que haría las veces de estación base en un sistema móvil) permanece en una posición fija del entorno y la antena transmisora, anclada sobre un mástil de teflón se ubica en diferentes posiciones de cada entorno, emulando a un usuario, y midiendo el S21 sobre el enlace ascendente.

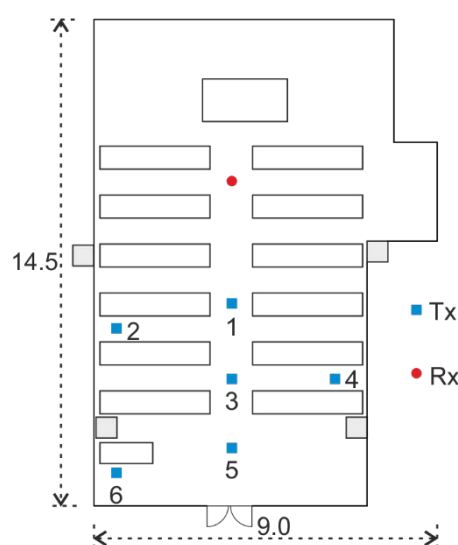
Por último, destacar que las medidas se realizaron preservando la estacionariedad del canal, evitando la presencia de personas en movimiento en ambos entornos.



**FIGURA 3.1** ESCENARIOS DE MEDIDA EN EL EDIFICIO INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN JOSÉ LUIS GARCÍA GARCÍA

### 3.2.1 Escenario 1: Sala Multiusos

El primer escenario a considerar es la Sala Multiusos del edificio, que está situada en la planta -2 y cuya vista en planta se muestra en la Figura 3.2. Es una sala prácticamente rectangular, con paredes recubiertas de placas de fibroyeso y donde merece destacarse que la puerta frontal es metálica y que el muro del fondo es de hormigón. En cuanto al mobiliario, la sala tiene seis filas de mesas con sus correspondientes sillas dispuestas a ambos lados de un pasillo central; así como un par de armarios de madera. Se van a realizar medidas en situación LOS con el escáner/receptor colocado en una posición fija, y el transmisor en 6 puntos distintos, tal y como se muestra en la Figura 3.2.



**FIGURA 3.2** VISTA EN PLANTA DE LA SALA MULTIUSOS CON DETALLE DE LOS PUNTOS DE MEDIDA

En las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 podemos apreciar la disposición de la sala, con las mesas en paralelo y sus correspondientes sillas, así como armarios y demás mobiliario, con el escáner plano en su posición de medida. Aunque ya se hizo con anterioridad algún apunte al respecto, recordar al lector que las paredes son de placas de fibroyeso, el mobiliario es de madera (a excepción del armazón de mesas y sillas que es metálico), el techo visto es un falso techo por encima del cual está la estructura de hormigón, y la doble puerta de acceso al recinto es metálica y se dejó cerrada durante las medidas.



**FIGURA 3.3 SALA MULTIUSOS, VISTA DESDE LA ZONA DE ACCESO**



**FIGURA 3.4 SALA MULTIUSOS, DETALLE CON ESCÁNER Y ANTENA TRANSMISORA AL FONDO**



**FIGURA 3.5 SALA MULTIUSOS VISTA DESDE UN LATERAL, CON SISTEMA DE CONTROL Y MEDIDA AL FONDO**

Tomando como referencia de posición la esquina inferior izquierda de la Figura 3.2, en la Tabla 3.1 se resumen las distancias de cada transmisor a dicho punto de referencia y se incluye la distancia euclídea desde la antena transmisora al centro del array plano de medida.

**TABLA 3.1 DISTANCIAS DE LOS PUNTOS DE TRANSMISIÓN EN LA SALA MULTIUSOS**

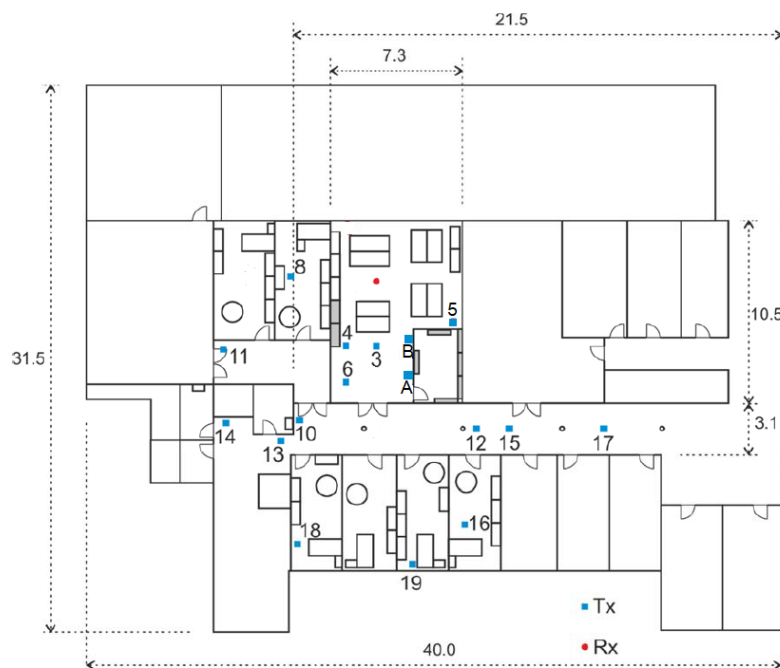
Transmisor	dx (m)	dy (m)	Distancia (m)
Centro del array	3.73163	9.76801	--
1	3.73163	6.04301	3.725
2	1.02163	5.61301	4.96
3	3.73163	4.04301	5.725
4	6.53163	4.04301	6.37
5	3.73163	2.04301	7.72
6	0.76163	1.24351	9.02

### 3.2.2 Escenario 2: Laboratorio S220

El segundo escenario de medidas es el laboratorio S220, situado también en la planta -2 del edificio. El laboratorio tiene despachos a los lados y a la entrada un pasillo central; al fondo da a un patio interior y, dentro del mismo laboratorio de simulación hay una estancia con estanterías metálicas que es un archivo. En la Figura 3.6 se puede ver el plano del laboratorio y los espacios próximos, mostrando una aproximación al mobiliario que nos encontramos en el entorno. En el laboratorio hay varios elementos que complican

la geometría, hay armarios metálicos, mesas, sillas, ordenadores, estanterías, biombos de madera con perfil metálico y el archivo. En las Figuras 3.7-3.9 se muestran diferentes imágenes del escenario de medida.

En este entorno, a diferencia del anterior, se van a realizar medidas en situaciones LOS y NLOS, con la antena receptora dispuesta sobre el escáner plano y ubicada en una zona fija más o menos centrada en el interior del laboratorio; y la transmisora en 18 puntos distintos, 6 en condiciones LOS, todos ellos situados dentro del laboratorio, y 11 en NLOS en los alrededores del laboratorio. En la Figura 3.6 tenemos la disposición de todos estos puntos.



**FIGURA 3.6 PLANO DEL LABORATORIO S220**

En lo que respecta a los materiales de construcción, en el laboratorio S220 las paredes también son de placas fibroyeso, el suelo y techo son de hormigón, aunque hay que precisar que hay un falso techo, y el mobiliario es de madera salvo los elementos destacados de forma sombreada en la Figura 3.6, y que se corresponde con armarios y estanterías metálicas. En todas las mesas hay ordenadores de sobremesa y hay que hacer constar que durante las medidas las puertas de acceso, también metálicas, estaban quitadas. Por último, la puerta de acceso al archivo permaneció cerrada durante la campaña de medidas llevada a cabo en este entorno.





**FIGURA 3.7 LABORATORIO S220 VISTO DESDE LA ENTRADA**



**FIGURA 3.8 LABORATORIO S220 VISTO DESDE LA ESQUINA FRONTAL DERECHA**



**FIGURA 3.9 LABORATORIO S220 VISTO DESDE LA ESQUINA FRONTAL IZQUIERDA**

Para las posiciones de medida mostradas con anterioridad en la Figura 3.6, en la Tabla 3.2 se recogen las distancias euclídeas desde cada punto de la antena transmisora al centro del mallado receptor.

**TABLA 3.2 DISTANCIAS ENTRE TRANSMISOR Y CENTRO DEL MALLADO RECEPTOR PARA CADA PUNTO DE MEDIDA EN EL LABORATORIO S220**

	Transmisor	Distancia euclídea (m)
LOS	A	5.4
	B	3.6
	3	3.5795
	4	3.7789
	5	4.9120
	6	5.9588
NLOS	8	4.9487
	9	6.9626
	10	8.6879
	11	9.2956
	12	10.3301
	13	10.8989
	14	11.2073
	15	11.3579
	16	14.7013
	17	15.1560
	18	16.0937
	19	16.0042

### 3.3 Configuración de las medidas

Para la realización de las medidas se ha mantenido la antena transmisora fija en cada punto de medida y la antena receptora se movía con las unidades lineales sobre una superficie plana. La antena transmisora y el punto central del mallado de la antena receptora se sitúan a una altura de 1,48 m. La receptora se desplaza en un barrido plano de 10x10 puntos, (10 posiciones en los ejes  $x$  e  $y$ ). Todos los puntos están uniformemente equiespaciados en ambos ejes, tal que  $\Delta x = 21$  mm y  $\Delta y = 21$  mm. En la Figura 3.10 se muestra un esquema que ilustra la evolución del barrido que se hace con la antena receptora sobre el plano. El barrido se ha realizado en  $y$  constante dado que la unidad lineal horizontal se mueve más rápido, reduciendo así el tiempo necesario para realizar cada medida.

En lo que respecta a la configuración del analizador de redes, la potencia en transmisión es de  $P_{TX} = 9$  dBm. En cada medida se va a medir la traza con el parámetro S21, considerando un total de 801 puntos de frecuencia entre 3 y 4 GHz, uniformemente separados entre sí 1,248 MHz. En la Tabla 3.3 se resumen los parámetros básicos con la configuración de las medidas. Hay que precisar que, en este TFG, las medidas se han centrado en utilizar en recepción y sobre el escáner plano, una antena direcciva y que, en la comparativa que se hará posteriormente al procesar estos resultados, se utilizarán resultados de una campaña de medidas previa realizada por el grupo GISAR en el marco de su actividad investigadora y en la que se utilizó en recepción y sobre el escáner plano una antena omnidireccional similar a la utilizada en transmisión.

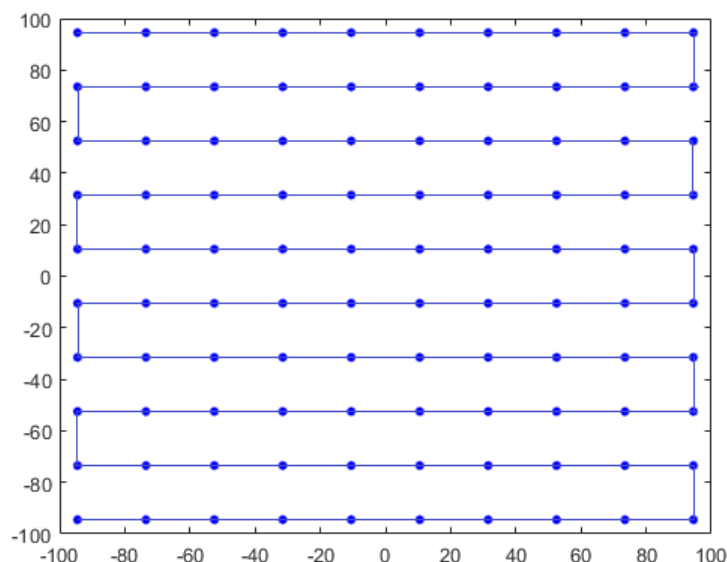


FIGURA 3.10 RECORRIDO DEL BARRIDO

TABLA 3.3 RESUMEN DE LA CONFIGURACIÓN DE LAS MEDIDAS

Calset	297	Barrido		Y constante
Ptx	9 dBm	Nº de puntos en X		10
BWIF	10 KHz	Nº de puntos en Y		10
Cable en TX	15 m	$\Delta x$		21 mm
Cable en RX	10 m	$\Delta y$		21 mm
htx	1,48 m	Origen (x,y)	Multisusos	(380, 540) mm
hrx	1,48 m		S220	(400,544) mm
Antena TX	347	Xinicial		-94,5 mm
Antena RX	HG2458-08LP	Xfinal		94,5 mm
		Yinicial		-94,5 mm
		Y final		94,5 mm

### 3.4 Software de postprocesado

Para realizar el postprocesado de las medidas se ha utilizado un software desarrollado en MATLAB por el grupo GISAR de la Universidad de Cantabria, cuya interfaz principal se puede observar en la Figura 3.11. La función principal de este software consiste en obtener las gráficas y datos representativos de parámetros como el PDP y el Path Loss, así como los derivados del PDP, ancho de banda de coherencia y RMS delay spread, de los cuales obtenemos, entre otros, gráficas de sus valores respecto a la distancia y sus CDFs correspondientes.

Para obtener dichos resultados, es necesario introducir las matrices con los valores del parámetro S21 que se obtuvieron en las medidas de canal. Utilizando las funciones “PDP” y “Path Loss”, que se pueden ver en la Figura 3.12, se obtienen las gráficas correspondientes y unos archivos de MATLAB que se pueden utilizar para sacar las estadísticas de Path Loss y PDP de toda la zona de medida, utilizando las funciones “PDP Stats” y “Path Loss Stats”.

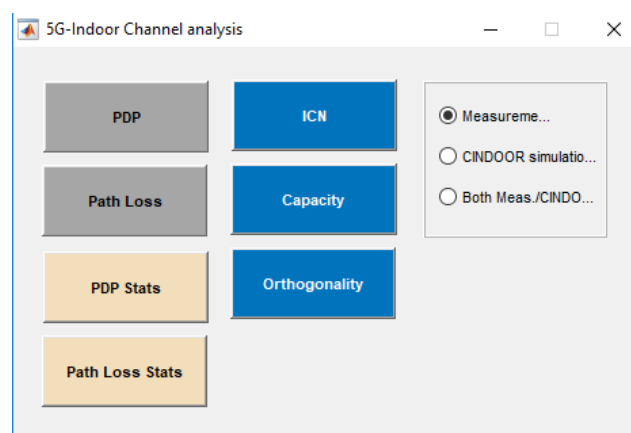


FIGURA 3.11 MENÚ PRINCIPAL DEL SOFTWARE DE POSTPROCESADO

(A)

(B)

FIGURA 3.12 (A) FUNCIÓN PDP. (B) FUNCIÓN PATH-LOSS

## 3.5 Resultados: Escenario 1

### 3.5.1 Path Loss

En la Figura 3.13 se muestran las pérdidas de propagación en función de la distancia entre antena transmisora y receptora, incluyendo los 100 puntos del array en cada posición de medida. Se incluyen las pérdidas con ambos tipos de antena en recepción, omnidireccional y directiva.

Se puede observar que las pérdidas varían ligeramente de una antena a otra. Estas desviaciones se deben a la directividad de la antena y puede considerarse que estos resultados son una primera aproximación a lo esperado, puesto que no se ha tenido en cuenta el verdadero diagrama de radiación de la antena directiva; en su lugar se ha tomado como referencia la ganancia máxima del lóbulo principal. El ajuste lineal con ambas

antenas es muy parecido, las dos rectas tienen una pendiente similar y, si se tuviera caracterizada la antena directiva, se entiende que las pérdidas de propagación debieran haber coincidido. En la Tabla 3.4 se encuentra un resumen de los parámetros del ajuste lineal, realizado de acuerdo a (2.6).

Por otra parte, en ambos casos tenemos unas pérdidas por debajo de las obtenidas en el espacio libre (recta representada en negro sobre la Figura 3.13), con un exponente de pérdidas  $n'$  menor que 2. Esto se debe a que en condiciones de interior algunas de las componentes del multicamino se suman en fase, aportando de forma constructiva, dando lugar al así conocido como efecto guía de onda. Dichas aportaciones se pueden ver con mayor claridad en la siguiente sección, dedicada al análisis de los estadísticos extraídos del PDP.

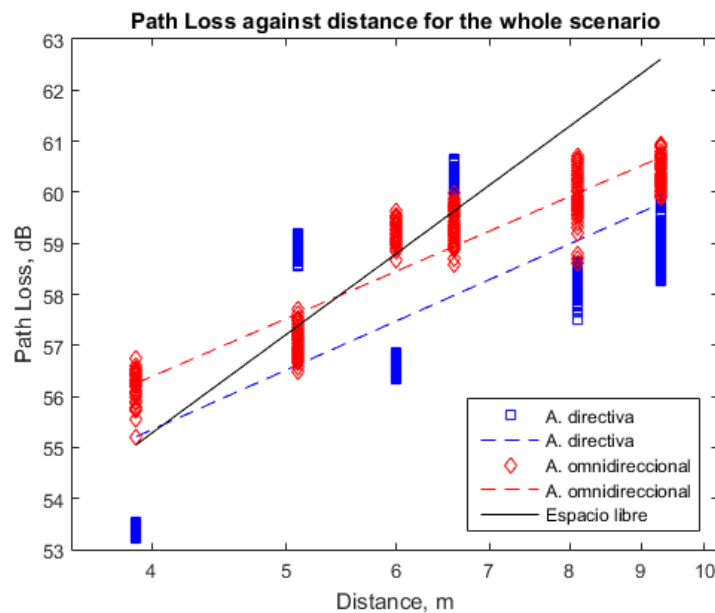


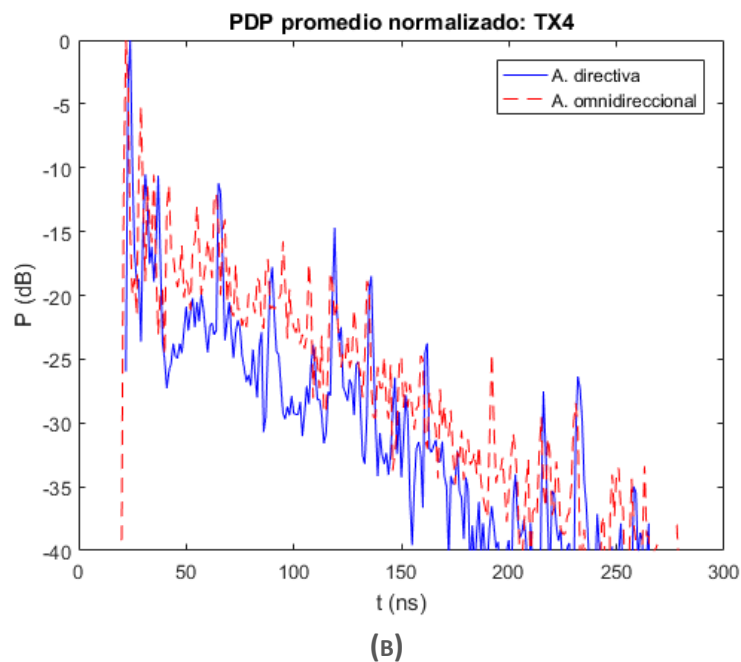
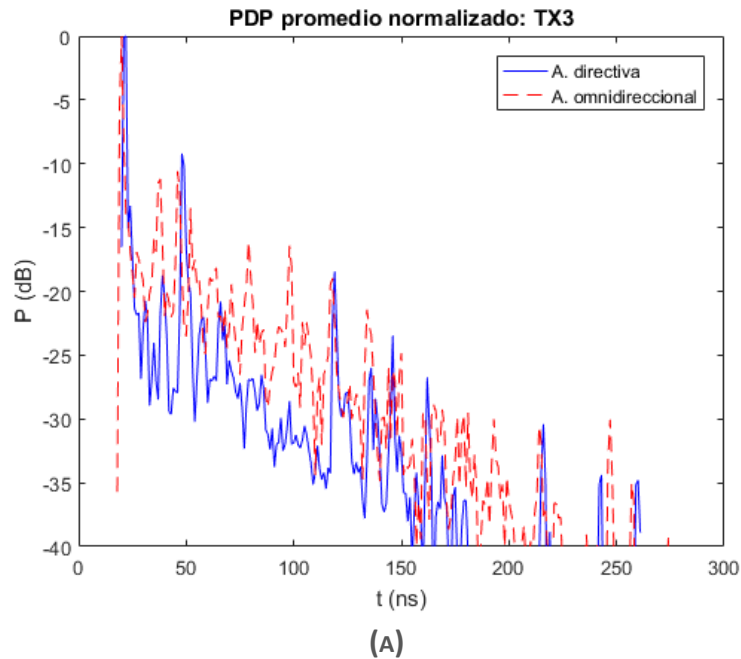
FIGURA 3.13 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

TABLA 3.4 PARÁMETROS DEL AJUSTE LINEAL DE LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN EL ESCENARIO 1

Antena Rx	$n'$	$PL_0$	$R^2$	$\sigma$ (dB)
Directiva	1.2105	48.0562	0.4660	1.6155
Omnidireccional	1.1726	49.3276	0.8728	0.5585

### 3.5.2 PDP

En la Figura 3.14 se muestran los PDP de dos puntos de transmisión representativos del escenario 1, uno de ellos justo delante de la antena receptora, TX3, y otro más apartado, TX4.

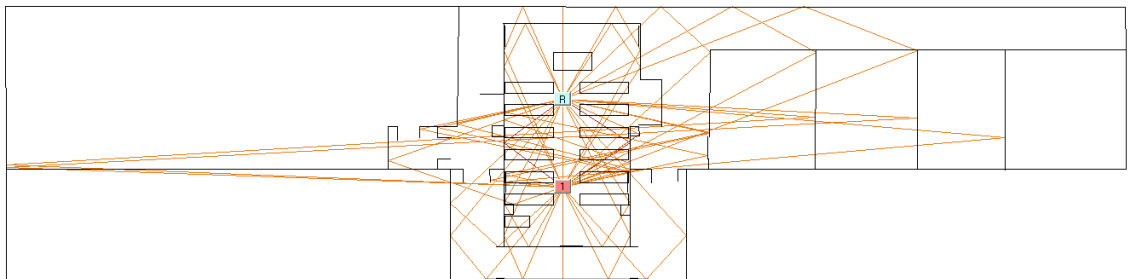


**FIGURA 3.14 PDP REPRESENTATIVOS DEL ESCENARIO 1. (A) TX3. (B) TX4.**

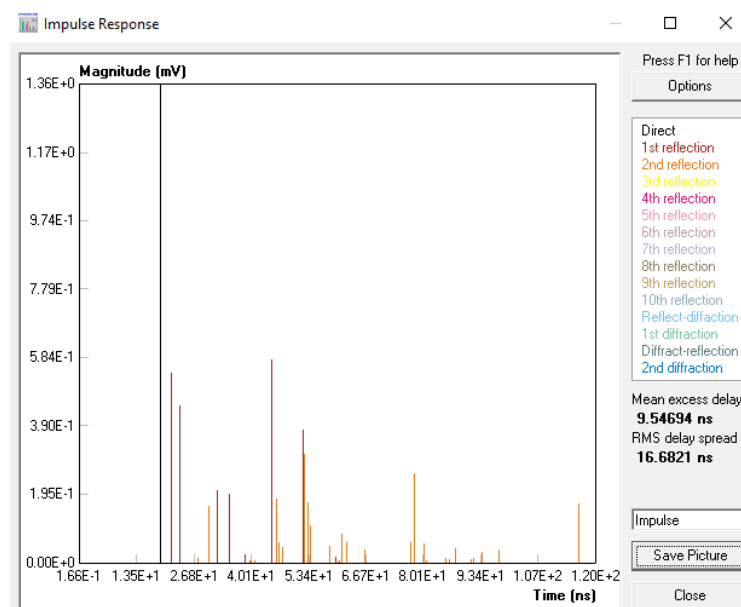
En la Figura 3.14 y para ambos casos, se puede observar que la primera aportación recibida y la dominante es la debida al rayo directo. También se ve que, en el caso de la

antena receptora directiva, recibe algunas aportaciones fuertes debidas al multicamino que le entren por delante, coincidiendo con la dirección de broadside, mientras que con antena receptora omnidireccional recibe más aportaciones considerables del multicamino, es decir, la antena directiva hace un filtrado espacial con lo que recibe una densidad espectral de potencia menor. Este hecho está asociado también con la alta relación delante atrás que tiene la antena directiva.

Utilizando la herramienta software CINDOOR se puede analizar con más detalle la procedencia de las aportaciones del multicamino. Tomando como ejemplo el punto TX3, en la Figura 3.15 se muestra el trazado de los rayos incluyendo primera y segunda reflexión en el análisis, y en la Figura 3.16 se muestra la respuesta al impulso obtenida.



**FIGURA 3.15 TRAZADO DE RAYOS PARA TX3 EN EL ESCENARIO 1, CON RAYO DIRECTO, 1ª Y 2ª REFLEXIÓN.**



**FIGURA 3.16 RESPUESTA AL IMPULSO OBTENIDA PARA TX3 EN EL ESCENARIO 1.**

Comparando la respuesta al impulso con el PDP se puede ver, fijándose en los tiempos de llegada, que el rayo directo claramente corresponde con el primer pico del PDP. En cuanto al resto de picos, los dos siguientes picos notables que la antena directiva posee y que comparte con la omnidireccional, se puede ver que corresponden a una primera reflexión con la puerta metálica y a una segunda reflexión fruto de la interacción



muro-puerta, puesto que son los que recibe la antena directiva por el lóbulo principal. En cuanto al resto de picos que se aprecian con la antena omnidireccional pero no con la directiva, se debe a primeras y segundas reflexiones con el entorno. En este caso, la antena omnidireccional recibe con potencia significativa las componentes del multicamino en estas direcciones, mientras que la directiva no, al no entrar por el lóbulo principal.

### 3.5.3 RMS delay spread

En la Figura 3.17 se muestra el RMS delay spread obtenido con ambas antenas y para los 6 puntos de transmisión, incluyendo las CDF asociadas.

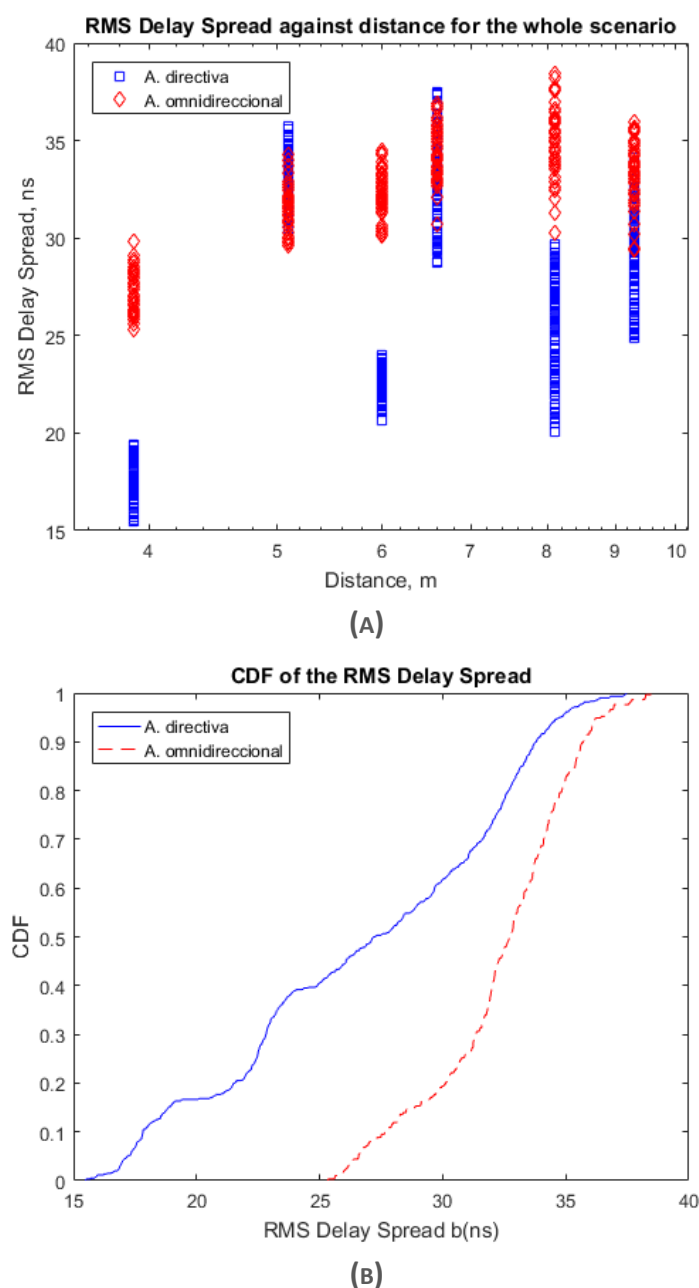
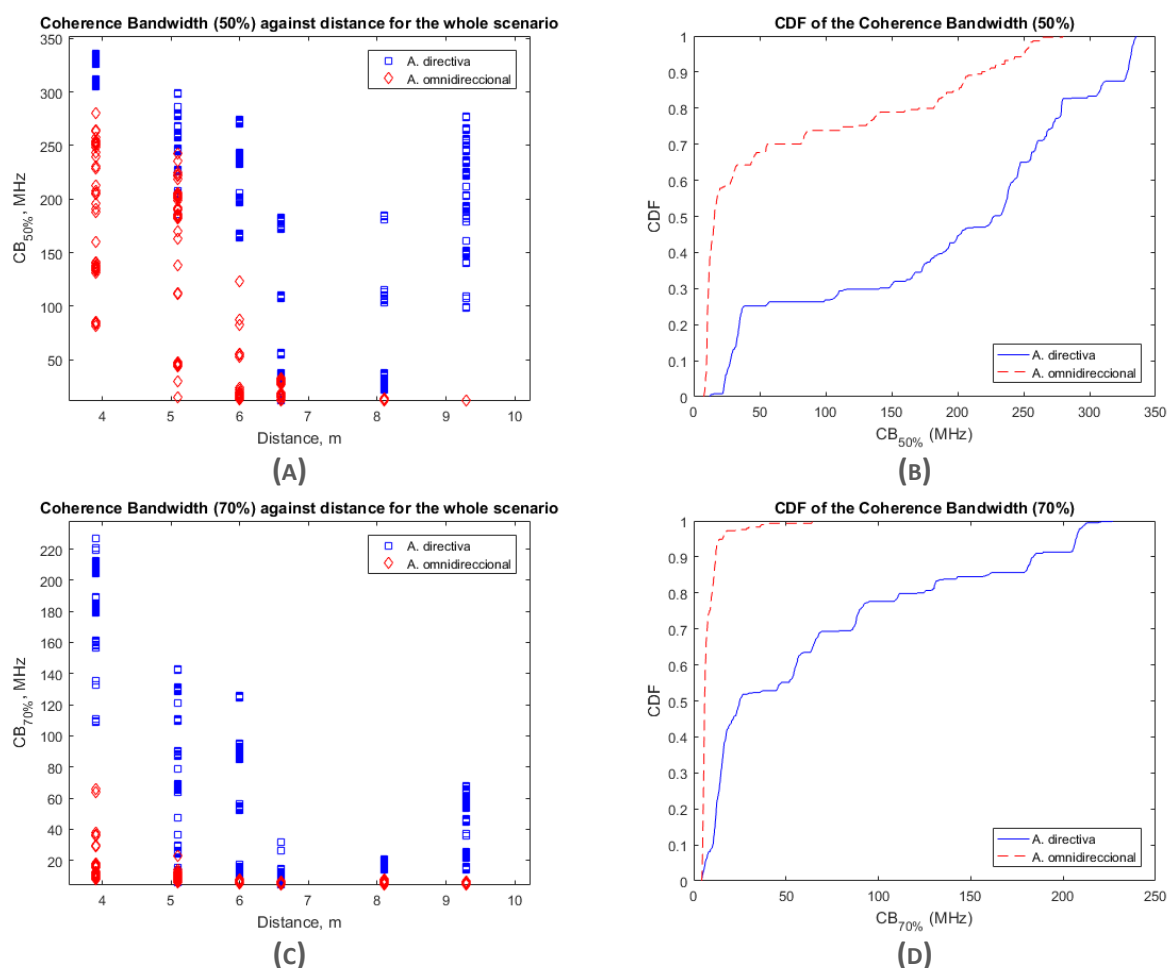


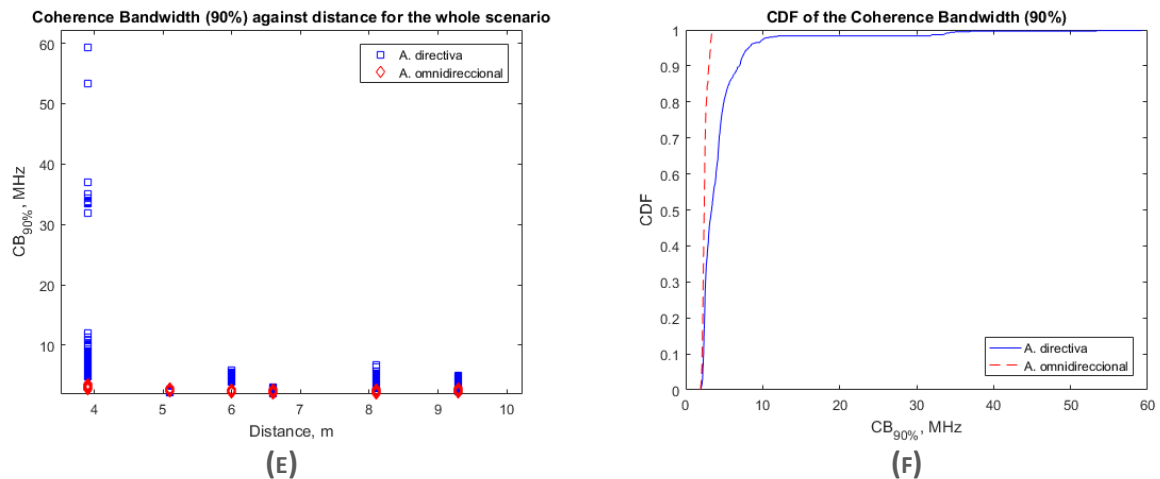
FIGURA 3.17 RMS DELAY SPREAD Y SU CDF EN EL ESCENARIO 1. (A) RMS DELAY SPREAD. (B) CDF DEL RMS DELAY SPREAD

En la Figura 3.17 se puede observar que, para la antena direcciva, los valores del RMS delay spread son menores. Por ejemplo, en el 90% de los casos el RMS delay spread es inferior a 32 ns con antena direcciva y a 35 ns con la antena omnidireccional. Es coherente con lo visto en los PDP puesto que la direcciva hace un filtrado espacial mientras que la omnidireccional recibe más aportaciones del multicamino y, en definitiva y matemáticamente, el RMS delay spread está asociado, con ciertos matices, con una integral del PDP. Esto implica que, en condiciones de igualdad de transmisión, con la antena direcciva se produciría una ISI menor que con la omnidireccional.

### 3.5.4 Ancho de banda de coherencia

En la Figura 3.18 se muestran los anchos de banda de coherencia obtenidos con ambos tipos de antena para los valores de correlación típicos de 0.5, 0.7 y 0.9. Se incluye, para cada posición del transmisor, las CDF asociadas.





**FIGURA 3.18 ANCHOS DE BANDA DE COHERENCIA Y SUS CDF EN EL ESCENARIO 1. (A)(B) 50% (C)(D) 70% (E)(F) 90%**

Se observa que los valores del ancho de banda de coherencia obtenidos son mayores para el caso de la antena directiva, lo cual tiene sentido comparándolo con el RMS delay spread puesto que tienen una relación inversa. Por ejemplo, para el caso del 50% de correlación, vemos que el ancho de banda de coherencia es superior a 25 MHz en el 90% de los puntos con antena directiva, mientras que, con la antena omnidireccional, solamente en el 40% se llega a ese valor. Para el caso del 70% de correlación, tenemos que, con la antena omnidireccional, los anchos de banda de coherencia son inferiores a 5 MHz con una probabilidad muy alta mientras que, con la antena directiva aún se alcanzan valores de hasta 25 MHz en el 50% de los puntos. Es decir, utilizando una antena directiva en recepción, sobre el escáner plano, se tendría menor selectividad frecuencial que con una omnidireccional.

## 3.6 Resultados: Escenario 2

En el entorno del laboratorio S220, al realizar el análisis de los resultados hay que distinguir entre dos situaciones muy distintas, según nos encontremos con posiciones de medida en condiciones LOS o NLOS.

### 3.6.1 Path Loss, LOS

En la Figura 3.19 se muestran las pérdidas de propagación en función de la distancia entre antenas transmisora y receptora obtenidas en el laboratorio S220 en condiciones LOS, incluyendo los 49 puntos del array en cada posición. En este estudio se consideraron 6 transmisores, todos ellos dentro del laboratorio S220 y que se pueden observar sus posiciones en la Figura 3.6.

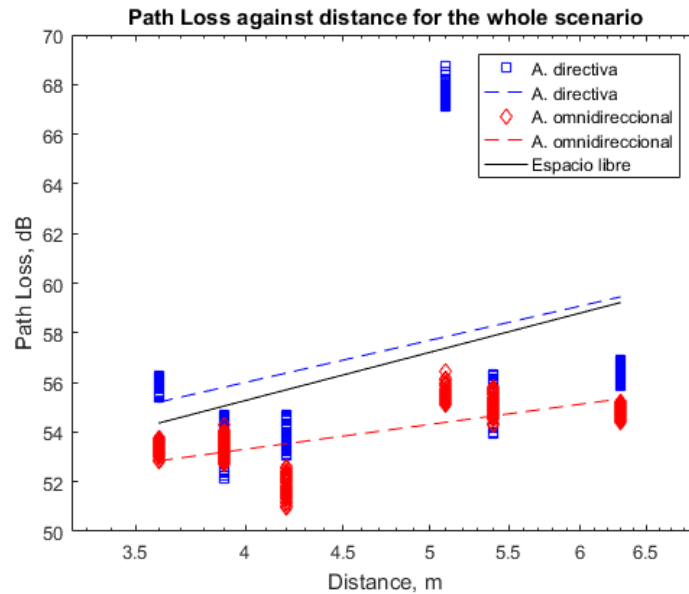


FIGURA 3.19 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA TRANSMISORES EN CONDICIONES LOS

De los resultados obtenidos se puede observar que las pérdidas de propagación apenas varían de una antena otra, excepto en el punto TX5, que, dada su posición y la geometría del laboratorio, hace que la componente directa llegue a la antena directiva por una dirección angular que experimenta una fuerte atenuación, aunque esto no se haya reflejado en los cálculos, lo cual justifica tales diferencias. El ajuste lineal con la antena omnidireccional es bueno, como cabría esperar en estas circunstancias, por debajo de las pérdidas de espacio libre, pero la directiva tiene el problema de ese punto de transmisión y de la falta de caracterización de su diagrama de radiación, estropeando el ajuste. En la Tabla 3.5 se encuentra un resumen de los parámetros del ajuste lineal realizado de acuerdo a (2.6). Se puede comprobar que el exponente de pérdidas  $n'$  es menor que 2 en ambos casos, no obstante, la desviación estándar  $\sigma$ , es muy grande en el caso de la antena directiva, debido al discordante punto TX5.

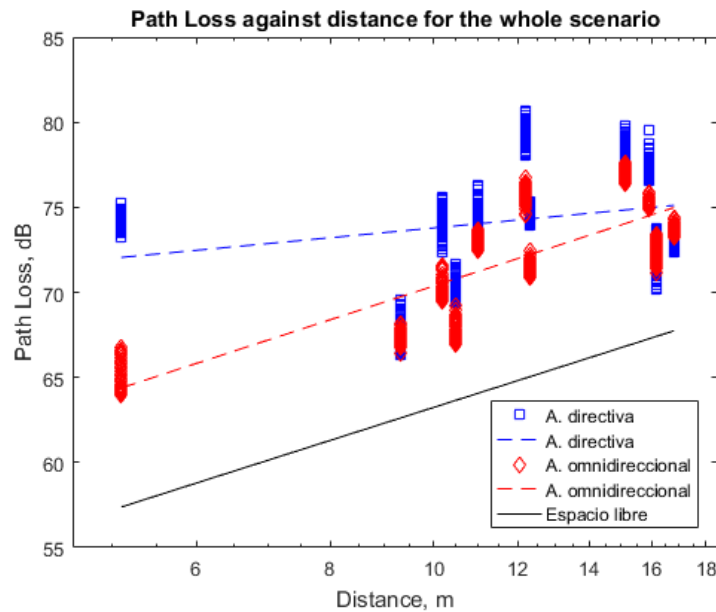
TABLA 3.5 PARÁMETROS DEL AJUSTE LINEAL DE LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN EL ESCENARIO 2, LOS

Antena Rx	$n'$	$PL_0$	$R^2$	$\sigma$ (dB)
Directiva	1.7456	45.4950	0.0949	4.5919
Omnidireccional	1.0281	47.1222	0.4448	0.9781

### 3.6.2 Path Loss, NLOS

En la Figura 3.20 se muestran las pérdidas de propagación en función de la distancia entre antena transmisora y receptora obtenidas en el entorno del laboratorio S220, pero en este caso para los transmisores en condiciones NLOS, incluyendo los 100

puntos del array de medida con la antena receptora directiva y los 49 puntos considerados con la omnidireccional.



**FIGURA 3.20 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA TRANSMISORES EN CONDICIONES NLOS**

Aunque las variaciones no son demasiado grandes de una antena a otra, el ajuste lineal nos muestra las diferencias, con una tendencia de las pérdidas con antena omnidireccional a crecer más rápidamente con la distancia, empezando siendo menores que con la antena directiva y llegando a alcanzarlas, lo cual es debido al diagrama de radiación de la antena. De estar completamente caracterizada la antena directiva, las rectas del ajuste lineal se prevé que hubieran coincidido o, al menos, estar más próximas.

En la Tabla 3.6 se muestra un resumen con los parámetros del ajuste lineal de acuerdo a (2.6). Vuelve a observarse en el caso de la directiva un valor del exponente de pérdidas inferior al obtenido en condiciones de espacio libre, sin embargo, es superior a 2 en el caso omnidireccional, lo cual se ajusta con la realidad, siendo condiciones NLOS.

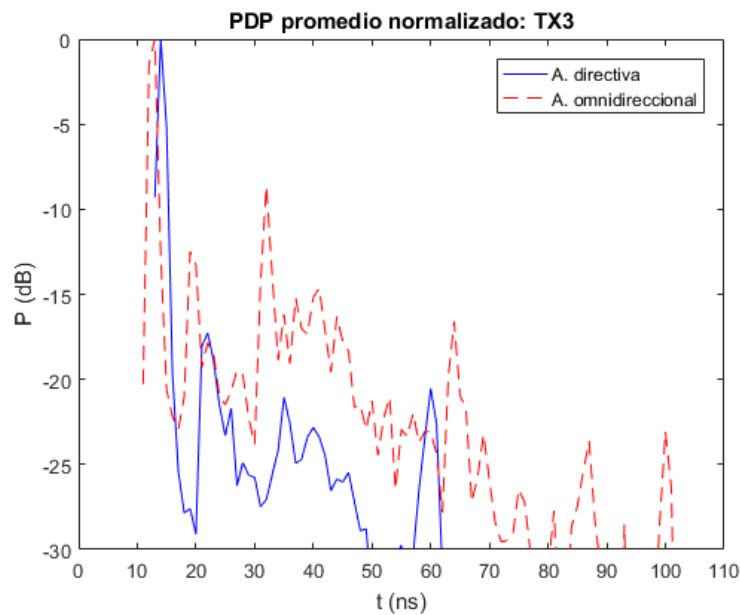
**TABLA 3.6 PARÁMETROS DEL AJUSTE LINEAL DE LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN EL ESCENARIO 2, NLOS.**

Antena Rx	$n'$	$PL_0$	$R^2$	$\sigma$ (dB)
Directiva	0.5911	67.8725	0.064	3.212
Omnidireccional	2.0464	49.9045	0.6488	2.1408

### 3.6.3 PDP, LOS

En la Figura 3.21 se muestra el PDP de un punto representativo de transmisión en condiciones LOS en el laboratorio S220 para antena receptora directiva y omnidireccional. En la figura se puede apreciar como la primera aportación recibida, que

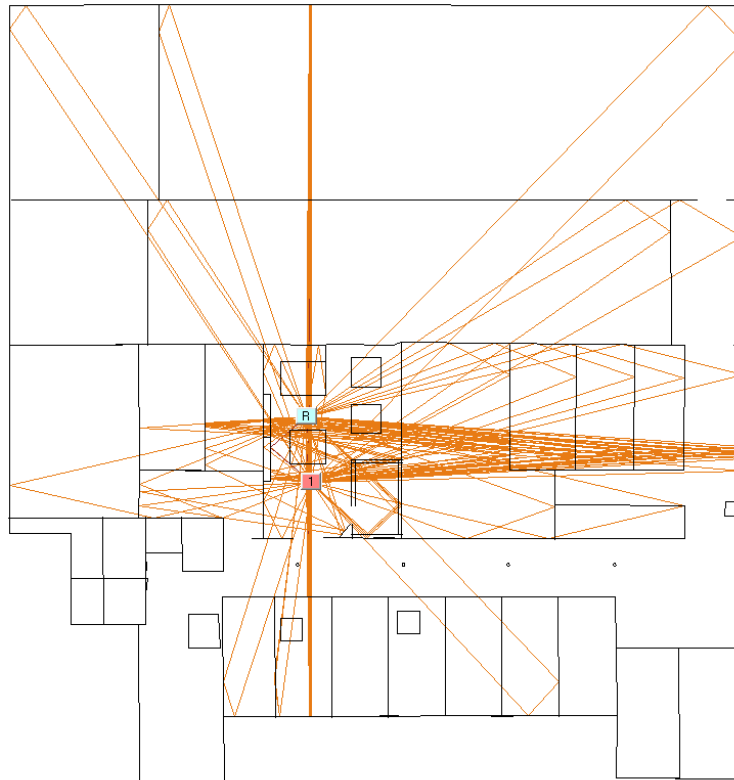
se corresponde con el rayo directo, es considerablemente más fuerte que las demás, siendo mucho más notable en la antena directiva puesto que el rayo directo se aprovecha totalmente de su directividad. Sin embargo, en el caso de la antena directiva, el resto de aportaciones decaen muchísimo por el filtrado espacial que ésta hace, y en el caso de la antena omnidireccional aún hay picos notablemente altos, dado que se reciben más componentes del multicamino, y se tiene una mayor densidad espectral de potencia.



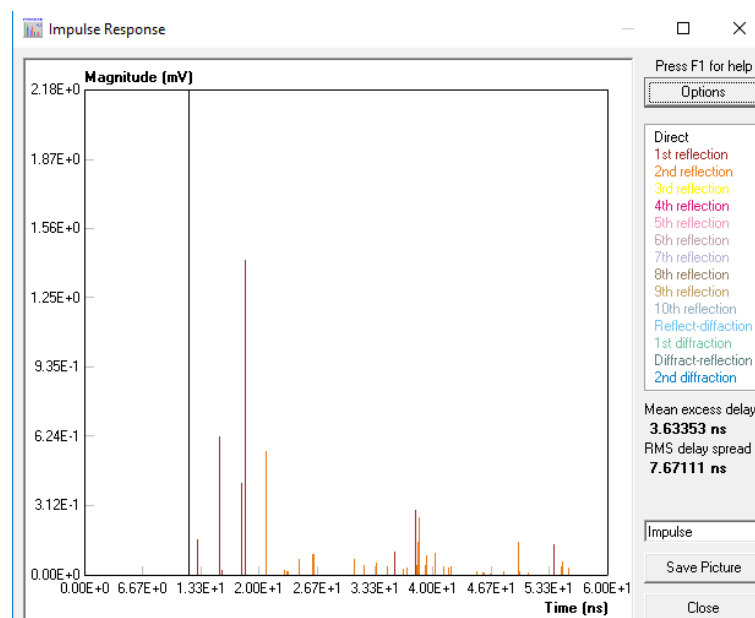
**FIGURA 3.21 PDP EN EL PUNTO TX3 DEL LABORATORIO S220**

Realizando un análisis con CINDOOR para confirmar tales conclusiones, se pueden cotejar estos resultados de forma visual. En la Figura 3.22 se puede ver el trazado de rayos obtenido, incluyendo en el estudio las contribuciones del rayo directo y de la primera y segunda reflexión. Por último, en la Figura 3.23 se incluye la respuesta al impulso obtenido para el punto de transmisión TX3.

Se puede ver cómo, además del dominante rayo directo, se obtienen unas fuertes primeras reflexiones y, aunque algo más débil, también hay una segunda reflexión considerable. Al entrar por diferentes direcciones, estas aportaciones son las que recibe con mayor facilidad la antena omnidireccional, como vimos en el PDP.



**FIGURA 3.22 TRAZADO DE RAYOS PARA TX3 EN EL ESCENARIO 2, CON RAYO DIRECTO, 1ª Y 2ª REFLEXIÓN.**



**FIGURA 3.23 RESPUESTA AL IMPULSO OBTENIDA PARA TX3 EN EL ESCENARIO 2.**

### 3.6.4 PDP, NLOS

Para los transmisores en situación NLOS, en la Figura 3.24 se muestra como ejemplo el PDP obtenido para uno de los transmisores, el TX 16, comparando los resultados obtenidos con ambos tipos de antena en recepción, directiva y omnidireccional.

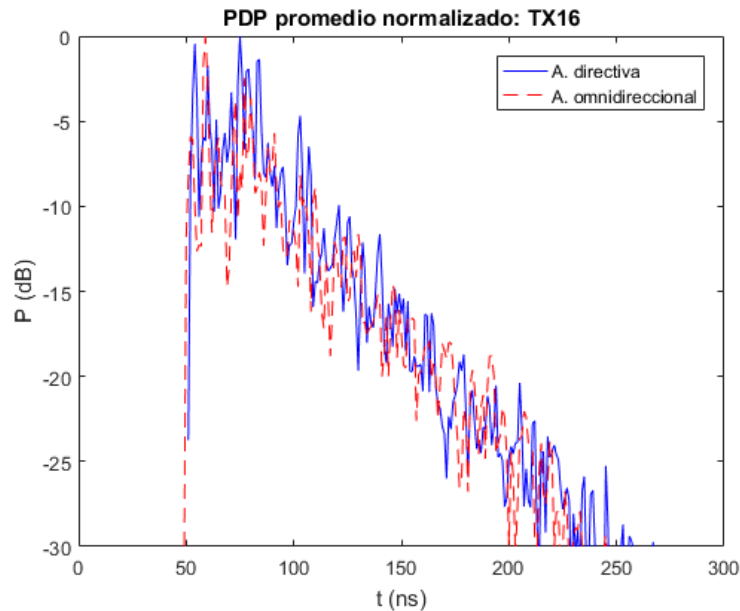


FIGURA 3.24 PDP EN EL PUNTO TX16 DEL LABORATORIO S220

En este caso se puede observar que el rayo directo no es la aportación más relevante dado que las obstrucciones entre extremos atenúan significativamente la componente directa. Dadas las condiciones del entorno, se ve como la potencia recibida decae rápidamente puesto que el entorno es complejo haciendo que los rayos lleguen difícilmente a la antena tras haber sufrido multitud de difracciones y atenuaciones en los materiales. Dada la complejidad del entorno, resultaría difícil discernir que componentes específicas del multicamino corresponden a cada aportación.

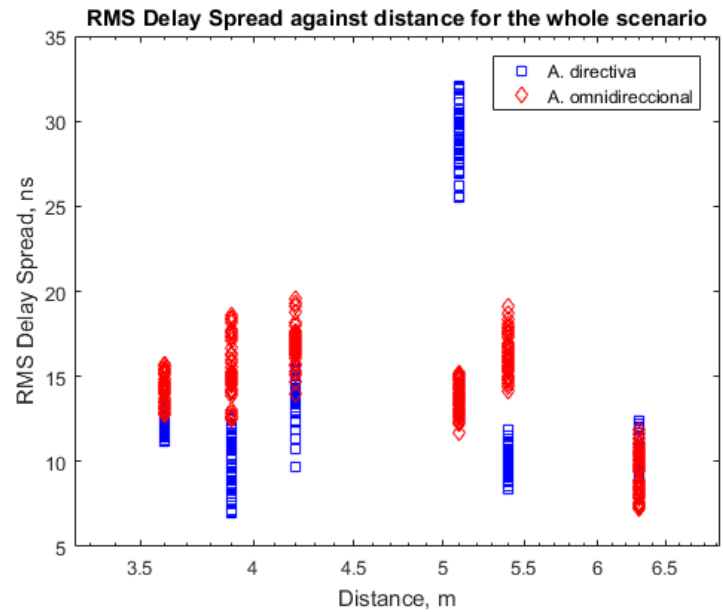
### 3.6.5 RMS delay spread, LOS

En la Figura 3.25 se muestran los valores que toma el RMS delay spread para los 6 puntos de medida en condiciones LOS, comparando los resultados obtenidos con ambos tipos de antenas. Se incluyen en la Figura 3.25(b) las CDF asociadas para las nubes de puntos mostrados en la Figura 3.25(a).

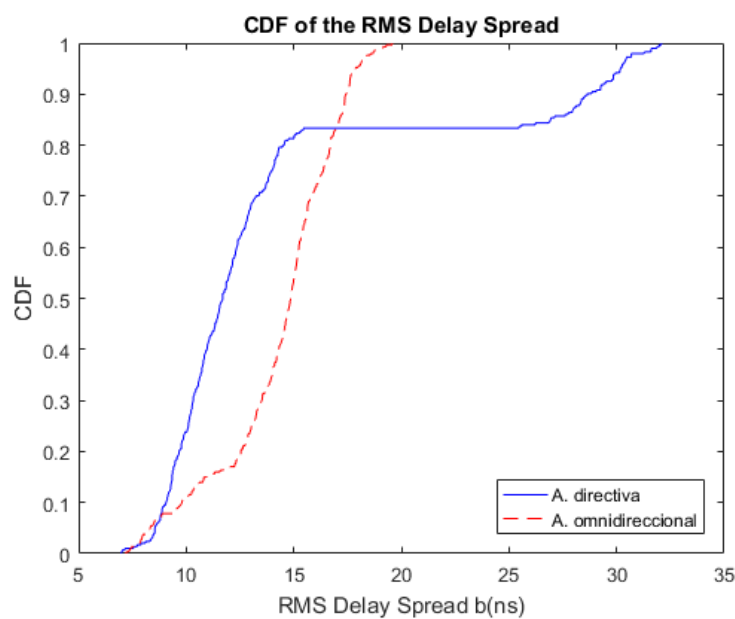
A la vista de los resultados obtenidos, se puede observar que en el 90% de los casos el RMS delay spread es inferior a 28 ns cuando se utiliza en recepción la antena directiva y a 17 ns cuando se emplea la antena omnidireccional. De hecho, en el 100% de los casos el valor obtenido es inferior a 20 ns, la antena omnidireccional funciona muy



bien en estas condiciones desde el punto de vista del retardo, sin embargo, si se relaja un poco el criterio, al 80% por ejemplo, la antena directiva sigue teniendo menor RMS delay spread, igual que en los casos anteriores ya comentados. Los mayores valores del RMS delay spread para el caso de la antena directiva se deben al punto de transmisión TX5, que es el que distorsiona principalmente la CDF respecto a lo esperado y ya comprobado en el otro escenario en condiciones LOS.



(A)

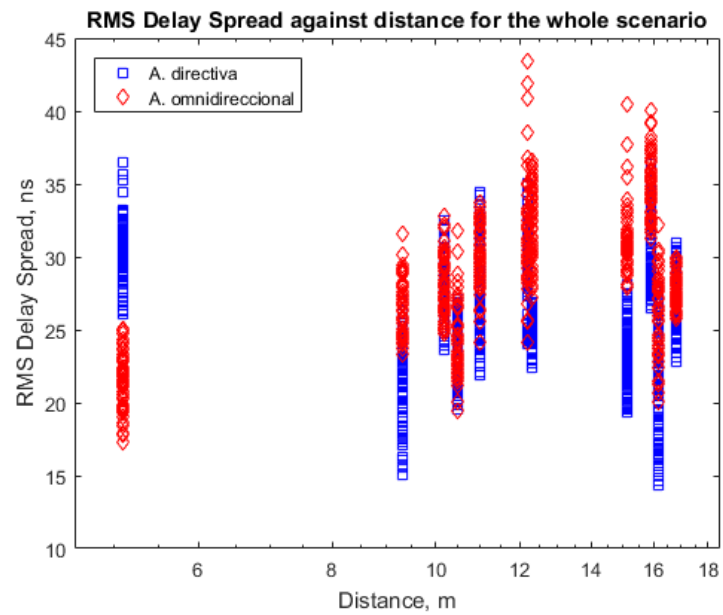


(B)

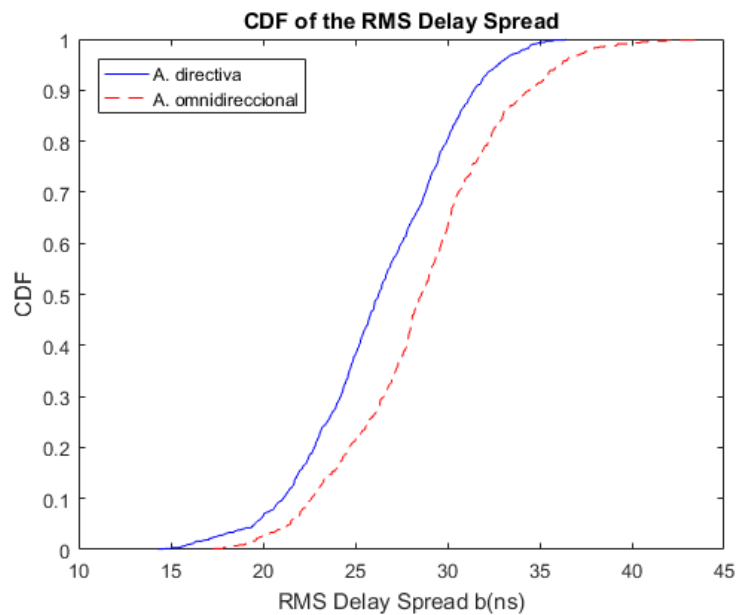
**FIGURA 3.25 RMS DELAY SPREAD Y SU CDF EN EL ESCENARIO 2, LOS. (A) RMS DELAY SPREAD. (B) CDF DEL RMS DELAY SPREAD**

### 3.6.6 RMS delay spread, NLOS

En la Figura 3.26 se muestran los valores del RMS delay spread frente a la distancia para los 11 puntos de transmisión en condiciones NLOS, tanto para antena receptora directiva como omnidireccional, y sus correspondientes CDF.



(A)



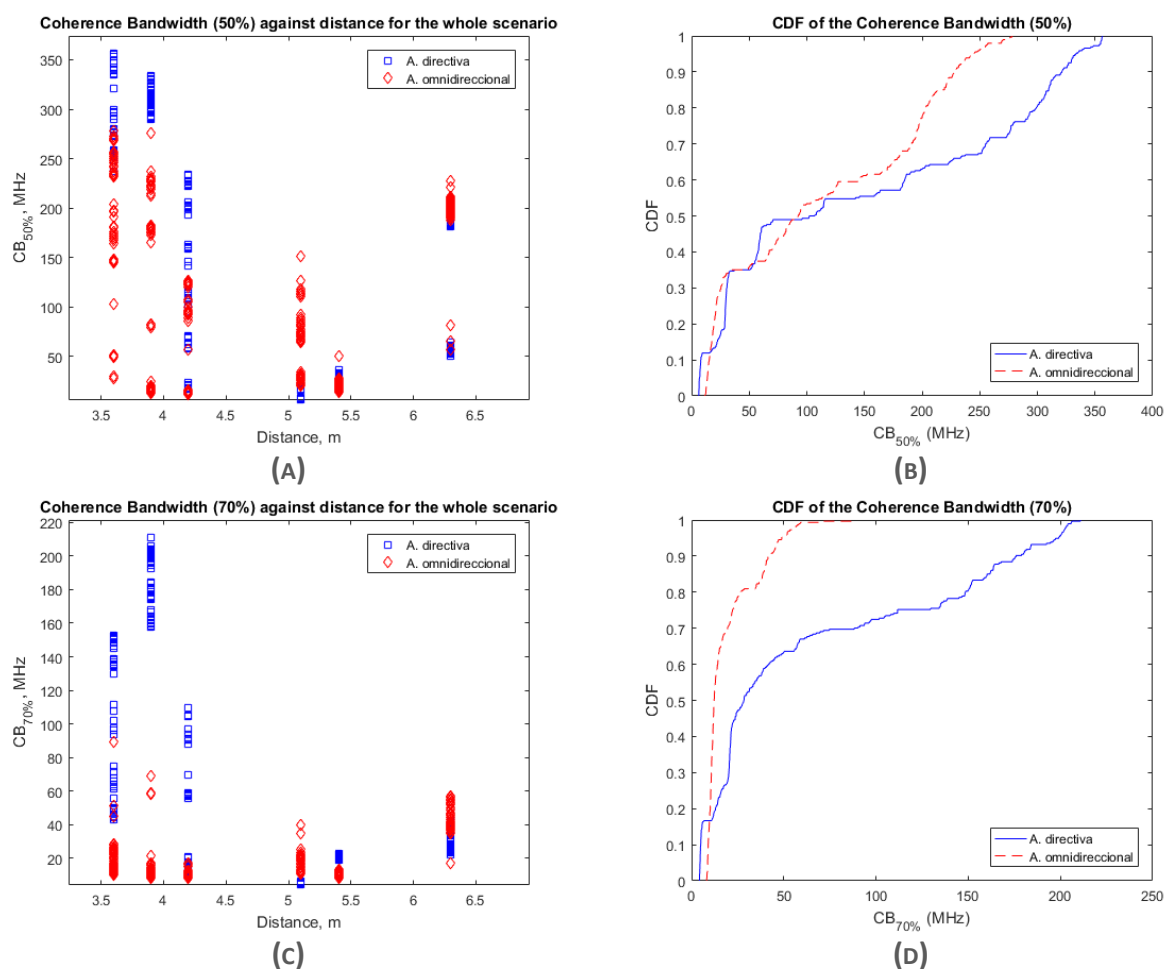
(B)

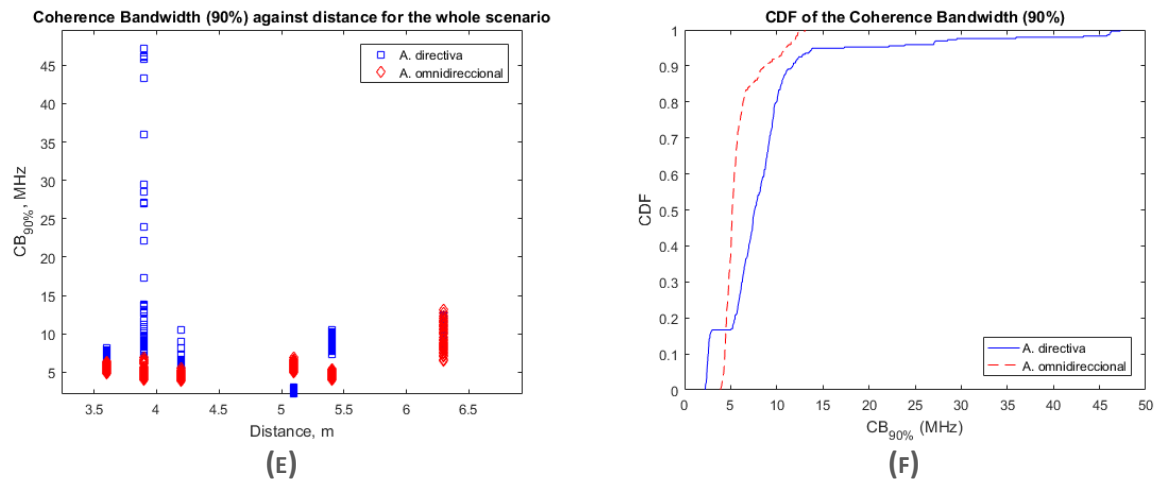
FIGURA 3.26 RMS DELAY SPREAD Y SU CDF EN EL ESCENARIO 2, NLOS. (A) RMS DELAY SPREAD. (B) CDF DEL RMS DELAY SPREAD

En este caso, el RMS delay spread es muy similar para ambas antenas, y eso se debe a que al haber tanta distancia se diluye el efecto de la antena directiva. Se puede observar que en el 90% de los casos el RMS delay spread es inferior a 30 ns con antena directiva y a 33 ns al repetir las medidas con la antena omnidireccional. La antena directiva tiene un comportamiento un poco mejor, esto puede ser debido a que, aunque en menor grado, una cantidad de las aportaciones del multicamino recibidas le lleguen por el lóbulo principal.

### 3.6.7 Ancho de banda de coherencia, LOS

En la Figura 3.27 se muestran los anchos de banda de coherencia para los valores de correlación típicos de 0.5, 0.7 y 0.9 y en los 6 puntos de transmisión del laboratorio S220 en condiciones LOS. Se incluyen las CDF correspondientes, tanto para antena receptora directiva como omnidireccional.





**FIGURA 3.27 ANCHOS DE BANDA DE COHERENCIA Y SUS CDF EN EL ESCENARIO 2, LOS. (A)(B) 50% (C)(D) 70% (E)(F) 90%**

Se puede observar que en este caso el ancho de banda de coherencia es más estable en el caso omnidireccional aunque, en realidad, salvo en el caso más estricto del 90%, en un porcentaje alto de los casos habría mayor ancho de banda de coherencia con antena direcciva. Por ejemplo, con una correlación del 70%, en el 80% de los casos el ancho de banda de coherencia sería superior con antena direcciva.

### 3.6.8 Ancho de banda de coherencia NLOS

En la Figura 3.28 se muestran los anchos de banda de coherencia para los valores de correlación típicos de 0.5, 0.7 y 0.9 en los 11 puntos de transmisión del entorno del laboratorio S220 en condiciones NLOS. Se incluyen junto a la nube de puntos asociada a cada posición del transmisor, las CDF correspondientes para cada posición de medida y comparando, como hasta ahora, el efecto de las medidas con los dos tipos de antena receptora, tanto direcciva como omnidireccional.

Se puede observar que las distribuciones de los anchos de banda de coherencia son bastante similares para ambos tipos de antena receptora, tanto en el caso de antena direcciva como en el de omnidireccional. Por otro lado, estos resultados entran dentro de lo esperado, puesto que las distribuciones del RMS delay spread también eran similares para ambos tipos de antena. El ancho de banda de coherencia para las directivas es ligeramente más alto; por ejemplo, en el caso del 70% e inspeccionando las CDF, puede concluirse que con antena omnidireccional tendríamos un ancho de banda de coherencia superior a 4 MHz en el 90% de los puntos medidos, mientras que sería superior a 5 MHz para el caso de la antena direcciva.

Otra cosa que se puede apreciar es que la distribución empeora rápidamente, si bien se dispone de un ancho de banda superior a 5 MHz en el 90% de los casos, es superior a 10 MHz en tan solo el 15% de los casos.

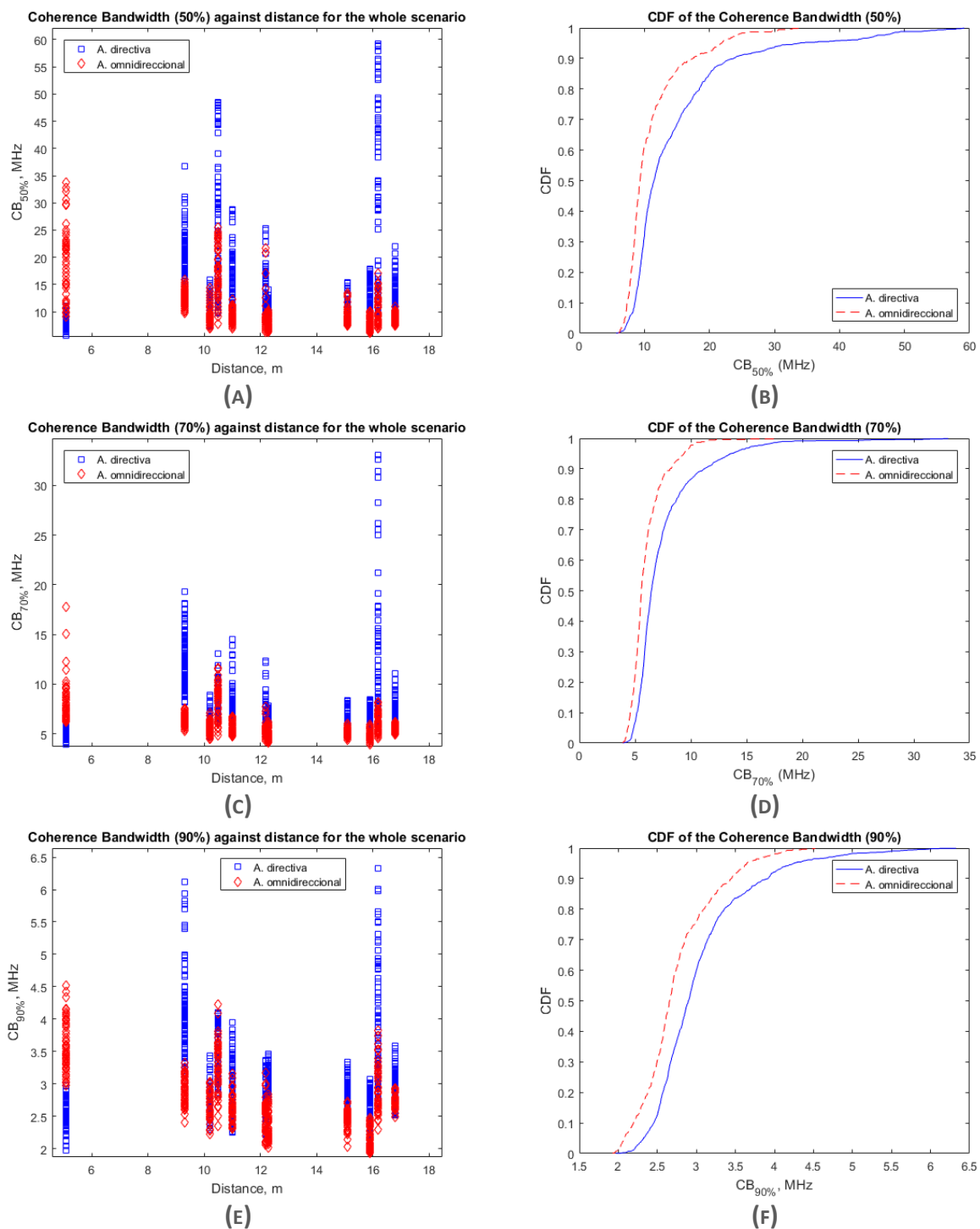


FIGURA 3.28 ANCHOS DE BANDA DE COHERENCIA Y SUS CDF. (A)(B) 50% (c)(d) 70% (E)(F) 90%

### 3.7 Conclusiones

En este capítulo se han mostrado los resultados obtenidos tras procesar las medidas realizadas en dos escenarios de interior y en diferentes puntos, considerando dos tipos de antena en recepción, una directiva y otra omnidireccional.

En el escenario 1, una sala de reuniones, se ha medido en condiciones LOS en diferentes puntos del entorno. En el escenario 2 se ha medido en condiciones LOS y NLOS. Cabe destacar que estos resultados son una primera aproximación realizada sin caracterizar completamente el diagrama de radiación de la antena directiva y se ha usado la ganancia en la dirección de broadside como ganancia de la antena en todos los casos.

En el escenario 1 se aprecian unos resultados bastante similares para ambas antenas, con unas pérdidas de propagación parecidas. Sin embargo, la antena directiva realiza un filtrado espacial, mientras que, la antena omnidireccional recoge mayores aportaciones del multicamino, lo que se traduce en una densidad espectral de potencia mayor, con un mayor RMS delay spread y menor ancho de banda de coherencia que en el caso de las medidas realizadas con la directiva, dando lugar a una menor ISI y menor selectividad frecuencial para el caso particular de las medidas con antena directiva en el array receptor.

En el escenario 2, en condiciones LOS, se aprecian unas mayores pérdidas que en el escenario 1, dada la mayor complejidad del entorno. Además, en el caso de la antena receptora directiva, en determinadas posiciones de la antena transmisora, no recibe las aportaciones importantes por el lóbulo principal, lo que empeora su rendimiento en esta situación. Sin embargo, en la mayoría de los casos mantiene un RMS delay spread menor y un ancho de banda mayor que la omnidireccional.

En condiciones NLOS, como cabía esperar, las pérdidas de propagación aumentan considerablemente y se recibe menor señal. En este caso las diferencias entre antena directiva y omnidireccional son muy pequeñas, esto se puede deber a que el efecto de la directividad se diluye con la distancia. Aunque muy similares, la distribución del RMS delay spread y el ancho de banda de coherencia son ligeramente mejores en el caso de la antena receptora directiva.

## ***Capítulo 4. Conclusiones y líneas futuras***

### **4.1 Conclusiones**

En este TFG se han analizado las características del canal radio en interiores en dos escenarios distintos en la banda de 3 a 4 GHz, cubriendo así una de las bandas que ha suscitado mayor interés para el despliegue de las primeras redes de comunicaciones móviles de quinta generación, la banda de 3,4 a 3,8 GHz. El estudio va un paso más allá y centra el análisis en el efecto del tipo de antena receptora, comparando los resultados obtenidos al utilizar una antena directiva y otra omnidireccional. Para ello se realizaron sendas campañas de medidas en cada escenario, cada una por partida doble, para antena receptora directiva y omnidireccional.

Las conclusiones obtenidas se basan en los principales parámetros de interés del canal considerados en el análisis, que son, el Path Loss, el PDP y los derivados de este último, obtenidos estadísticamente, el RMS delay spread y el ancho de banda de coherencia. Para obtener dichos parámetros, en las campañas de medidas se ha medido el parámetro representativo de la función de transferencia del canal, el parámetro S21 y, mediante las expresiones matemáticas presentadas en el Capítulo 2 y apoyándonos en una aplicación desarrollada por el grupo GISAR en MATLAB, se han visualizado tales resultados.

En lo que respecta a los resultados obtenidos y conclusiones extraídas en este TFG respecto al uso de la antena receptora directiva, se puede concluir que son simplemente una primera aproximación a la interpretación fiel de los resultados, dado que no se dispone de la caracterización experimental de la antena directiva y, en este TFG, nos hemos limitado a los datos de la hoja de características del fabricante, utilizando en los balances de enlace el dato de la ganancia máxima en la dirección de broadside de la antena.

En general, se aprecian grandes similitudes entre los resultados obtenidos en las medidas con ambos tipos de antena receptora, directiva y omnidireccional. Sin embargo, la antena directiva realiza un filtrado espacial, con lo que recibe menores aportaciones del multicamino y menos densidad espectral de potencia, aspecto que se pone de manifiesto al interpretar los resultados gráficos del perfil potencia retardo para algunos de los transmisores más representativos de ambos entornos. Además, la antena directiva tiene un rendimiento ligeramente mejor desde el punto de vista del RMS delay Spread y el ancho de banda de coherencia, teniendo un menor RMS delay Spread y mayor ancho de

banda de coherencia que la omnidireccional, lo que se traduce en menor ISI y menor selectividad frecuencial. En condiciones NLOS y a mayor distancia, las diferencias disminuyen aún más puesto que se diluye el efecto de la antena directiva.

## **4.2 Líneas futuras**

Como ya se ha comentado en la sección anterior, los resultados obtenidos para el caso de la antena receptora direccional no pueden calificarse como concluyentes, debido a la incompleta caracterización de la antena utilizada. En este sentido, una primera línea futura de actuación podría ir dirigida a caracterizar totalmente la antena directiva en la cámara anecoica, obteniendo su curva real de ganancia por un lado y, por otro, o bien el diagrama en 3D de radiación de la antena o los dos cortes principales del mismo para poder considerarlo en el balance de enlace.

En lo que respecta a las medidas del canal radio, otra línea de actuación futura podría considerar la realización de nuevas campañas de medida Indoor-Outdoor, para observar el comportamiento al cambiar el entorno del canal radio de interior a exterior, o viceversa, durante la transmisión.

Por último, una línea futura de especial interés para los sistemas de comunicaciones 5G venideros es la subida en frecuencia, dada la saturación del espectro y teniendo en mente la inminente reunión WRC'19 prevista para noviembre de este año. El planteamiento a futuro es subir en frecuencia, a bandas donde existen mayores anchos de banda contiguos susceptibles de facilitar el cumplimiento de los retos de los sistemas 5G. Como ya se comentó en el Capítulo 1, ya hay un apoyo manifiesto de la industria móvil a la banda de 26 GHz y también existe la intención de subir a nivel comercial por encima de los 30 GHz, por lo que resultará necesario caracterizar el canal radio para dichas bandas de frecuencias, siendo la de 26 GHz la más inmediata.



# Referencias

- [1] ITU “Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante” 09/2015
- [2] Jeffrey G. Andrews y otros, “What will 5G be?”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 32, No. 6, 2014.
- [3] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital, “Plan Nacional 5G 2018-2020”
- [4] European Commission, Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Electronic Communications Networks and Services, Radio Spectrum Policy Group, RSPG Secretariat, “Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G)” *RSPG16-032 Final*, 9 de Noviembre de 2016
- [5] General Services Administration “Telecommunications: Glossary of Telecommunication Terms” *Federal Standard 1037C*, 7 de Agosto, 1996
- [6] ITU “Cálculo de la atenuación en el espacio libre”, *Rec. UIT-R P.525-2 1*, Noviembre 2016
- [7] S. Promwong, y J. Tanaka, “Free space link budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas”, *IEICE Electronics Express*, vol 1, No. 7, pp. 188-192, 2004
- [8] Transparencias de la asignatura Comunicaciones Móviles e Inalámbricas del Grado en Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria. Jesus Ramón Perez López
- [9] Iván López Barriuso, “Diseño de un entorno automatizado de caracterización de antenas”, Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Cantabria, Julio 2005.